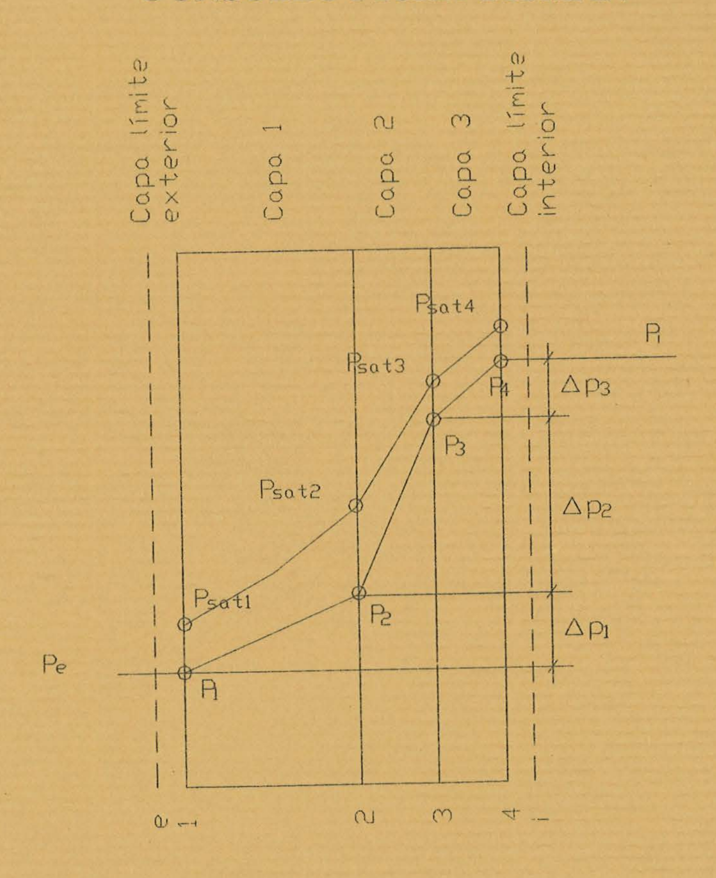
LAS CONDENSACIONES DEL EDIFICIO: DETERMINACIONES DEL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

por

F. JAVIER NEILA GONZÁLEZ

CÉSAR BEDOYA FRUTOS

CONSUELO ACHA ROMÁN



DEL INSTITUTO JUAN DE HERRERA DE LA *ESCUELA DE ARQUITECTURA DE MADRID*

2-20-22

LAS CONDENSACIONES DEL EDIFICIO: DETERMINACIONES DEL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

por

F. JAVIER NEILA GONZÁLEZ

CÉSAR BEDOYA FRUTOS

CONSUELO ACHA ROMÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-20-22

C U A D E R N O S
D E L I N S T I T U T O
J U A N D E H E R R E R A

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

NUEVA NUMERACIÓN

2 Área
20 Autor
22 Ordinal de cuaderno (del autor)

Las condensaciones en la envolvente del edificio: Determinaciones del Código Técnico de la Edificación

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Gestión y portada: Nadezhda Vasileva Nicheva
CUADERNO 228.01/2-20-22
ISBN-13: 978-84-9728-218-5
ISBN-10: 84-9728-218-3
Depósito Legal: M-43102-2006

LAS CONDENSACIONES EN LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO: DETERMINACIONES DEL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Una de las patologías no estructurales típicas en los edificios, causa del deterioro de los cerramientos y pérdida de la habitabilidad de los locales, es la presencia de humedad en ellos. El grado de afección es variable y va, desde la descomposición del material, si es afectable por el agua, hasta la modificación de su comportamiento térmico, pasando por la formación de mohos, manchas o el desprendimiento de los acabados.

Estos problemas surgen con mayor fuerza en las construcciones realizadas con baja calidad, poco aisladas y con soluciones constructivas mal resueltas; en los locales con niveles de bienestar interior reducidos (temperaturas bajas y humedades altas); en viviendas mal ventiladas y con un sistema de calefacción empleado deficientemente (con un horario de uso irregular y habitaciones desequilibradas térmicamente); y en locales en los que la gran ocupación y el hacinamiento suponen fuentes interiores importantes de generación de vapor de agua.

Si bien todas las humedades, en último término, las provoca el agua líquida, su origen previo puede estar en la fase líquida o en la fase gaseosa.

Las humedades provocadas por el agua líquida son las humedades de capilaridad, humedades a través de la cubierta, provocadas por las instalaciones hidráulicas y sanitarias, o humedades directamente provocadas por la lluvia sobre la fachada. Este tipo de humedades tiene mucho que ver con la absorción de agua de los materiales, por lo que, los materiales con coeficientes de absorción pequeños, se ven menos afectados.

Sin embargo, existen otro tipo de humedades, que son las denominadas de *condensación*, y que son provocadas por el agua en fase gaseosa, es decir, el vapor de agua. La cantidad de vapor de agua contenida en el aire que respiramos es pequeña, menos de un 3%. Sin embargo, sus efectos tanto sobre los individuos como sobre los materiales, son muy notables.

Las humedades de condensación se producen cuando el vapor de agua cambia de fase y se condensa en forma de líquido. Esto, que se produce en el ambiente exterior casi a diario, con el rocío, cuando se produce en el interior de los locales adquiere el carácter de patología.

Las *humedades de condensación*, en función de sus causas concretas, los problemas que acarrean y sus soluciones específicas, se pueden dividir en dos nuevos grupos:

- Condensaciones superficiales
- Condensaciones intersticiales

2. LAS HUMEDADES DE CONDENSACIÓN

Las humedades de condensación se producen por el cambio de estado del vapor de agua presente en el aire, a fase líquida. ¿Por qué se produce este cambio de fase? El estado de los materiales depende de la energía que llevan asociada y que proporciona mayor o menor grado de libertad a sus moléculas. Un gran nivel de energía supone gran excitación de los electrones de las moléculas, lo que representa que se liberen de sus uniones y se muevan libremente; es la fase gaseosa. Un menor nivel de energía permite únicamente el deslizamiento entre las moléculas, la fase líquida, y el grado menor de energía, impide completamente cualquier grado de libertad entre las moléculas, es la fase sólida.

Por ello, pasar de fase gaseosa a fase líquida representa una pérdida de energía, que generalmente se produce por enfriamiento. Es necesario que se agrupen al menos 1000 moléculas para que consideremos que hay líquido, aunque hacen falta mil veces más, es decir, un millón de moléculas, para que apreciemos la presencia de una gota.

Existe un segundo fenómeno, que combinado con el anterior provoca las condensaciones. El aire atmosférico no es capaz de contener una cantidad ilimitada de vapor de agua, ya que éste no es un gas perfecto[1]. La cantidad de vapor que contiene el aire, que, como se sabe se denomina humedad específica (HE), a efectos del cálculo de las condensaciones, se cuantifica por la presión que ejerce, la presión de vapor (P). Este valor tiene un límite denominado humedad específica de saturación (HE_{sat}) o presión de vapor de saturación (P_{sat}), que es la presión que ejerce el vapor en un ambiente saturado.

La cantidad máxima de vapor que puede contener un ambiente y su presión de vapor de saturación, se puede representar simbólicamente por un vaso. Este vaso tiene tamaños distintos según la temperatura. Para temperaturas altas el vaso se dilata y es muy grande; para temperaturas bajas el vaso se contrae y se vuelve pequeño

Según se encuentre más o menos lleno ese vaso el ambiente estará más o menos húmedo. Si está lleno hasta la mitad diremos que hay una humedad relativa del 50%, y si está repleto diremos que hay una humedad relativa del 100% y que el ambiente está saturado (Fig. 1).

Este fenómeno es el que provoca que en invierno la humedad relativa siempre sea muy alta, el 80 ó 90%, lo que no quiere decir que haya mucha humedad, sino que el tamaño del vaso es muy pequeño y, por tanto, su capacidad muy reducida. Sin embargo, en verano, con contenidos de humedad mucho más altos (HE y P altas), la humedad relativa puede mantenerse entre el 30 y el 60%, al ser el vaso contenedor mucho mayor.

---

[1] NEILA GONZALEZ, F. Javier y BEDOYA FRUTOS, César. Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. Madrid, Munilla-Lería. 2005. Capítulo 2. La psicrometría.

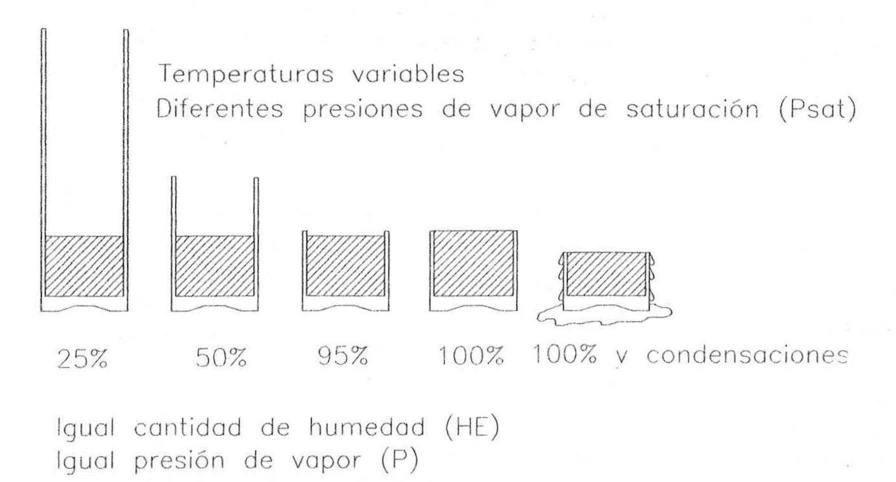


Fig. 1. Representación figurada del concepto de humedad relativa

En un ambiente se pueden producir condensaciones por dos motivos: al incorporarle humedad y rebosar el vaso, ocurre en los cuartos de baño al usar las duchas, o, sin variar el contenido de humedad del local, al reducirse el tamaño del vaso por enfriamiento, son las condensaciones patológicas.

Una de las formas de enfriamiento que reduce el tamaño del vaso es el contacto con un cuerpo frío. Ese cuerpo frío puede ser la superficie o las capas interiores de los cerramientos. Si mediante este enfriamiento se supera el límite máximo (capacidad del vaso) habrá condensaciones. Si las condensaciones se producen en la superficie del cerramiento se denominan *condensaciones superficiales*, y si se producen en el interior de los mismos *condensaciones intersticiales*.

El punto en el que comienzan a producirse condensaciones lo fija la menor temperatura a partir de la cual empezará el cambio de fase, es decir, a la que coinciden el tamaño del vaso y la cantidad de vapor (humedad relativa del 100%). Esa temperatura se denomina *temperatura de rocío*. Si la temperatura del objeto frío, es decir, la temperatura de la superficie interior de la pared, es menor que la *temperatura de rocío* de la habitación, habrá *condensaciones superficiales*.

3. LAS CONDENSACIONES SUPERFICIALES

Dado que el problema depende tanto de *la temperatura superficial del cerramiento* como de la *temperatura de rocío del ambiente*, para su evaluación se deben calcular ambos valores.

TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR <> TEMPERATURA DE ROCÍO

Para conocer la temperatura superficial de la cara interior del cerramiento se debe hacer una lectura gráfica en su escala de temperaturas o, si se desea obtener mayor precisión, emplear la siguiente expresión:

$$\theta_{si} = \theta_i - U \cdot R_{si} \cdot (\theta_i - \theta_e) \qquad [1]$$

La temperatura de rocío es la menor temperatura a la que puede estar un

ambiente antes de que empiecen a producirse condensaciones, es decir, la temperatura a la que un ambiente tendría una humedad relativa del 100% sin modificarse la humedad específica. Se obtiene de un diagrama psicrométrico trazando una línea horizontal desde el punto que representa al ambiente interior, hasta cortar con la curva de saturación, donde se realiza la lectura.

A modo de ejemplo, un cerramiento muy mal aislado, con un U de 2,50 $W/m^2 \cdot K$, situado entre dos ambientes con 20 °C el interior y 0 °C el exterior, empleando la expresión [1] se ve que tiene, en esas circunstancias concretas, una temperatura superficial de 14,50 °C. Comprobando en un diagrama psicrométrico se puede ver que a partir de una humedad relativa interior del 70% comenzaría a tener condensaciones superficiales. Si en lugar de tener un U tan alto estuviera mejor aislado y el valor de su coeficiente de transmisión de calor fuera 0,60 $W/m^2 \cdot K$, bajo las mismas condiciones ambientales tendría una temperatura superficial de 18,68 °C, que llevaría el riesgo de condensaciones superficiales a una humedad relativa interior de más del 90%. Esto es debido a la influencia de las capas límite de aire, que ofrecen siempre la misma resistencia, por lo cual, cuando se reduce la resistencia de los materiales que constituyen el cerramiento las resistencias superficiales pasan a tener un porcentaje de resistencia sobre el total superior que cuando se trata de un cerramiento muy aislado y, por tanto, muy resistente. En el primer caso a las resistencias superficiales corresponderá un salto térmico mayor que en el segundo caso.

La cuantía del agua condensada se puede calcular con la siguiente expresión:

$$M_{CS} = C_S \cdot (P_s - P_{vs})_s \cdot S \cdot t \qquad [2]$$

Expresión en la C_S es el coeficiente de condensación superficial, que toma un valor promedio de 40,155 $g/MPa \cdot m^2 \cdot s$, S la superficie sobre la que se producen condensaciones en metros cuadrados y t el tiempo en el que se producen en segundos. Las presiones de vapor y de vapor de saturación que aparecen entre paréntesis y con subíndice s se calculan para la temperatura superficial.

4. LAS CONDENSACIONES SUPERFICIALES EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

El *Código Técnico de la Edificación (CTE)*, en relación con las condensaciones superficiales, determina las condiciones que se deben cumplir para evitar la formación de mohos en su superficie interior, que por su carácter higroscópico pudieran atraer humedad del ambiente.

Aún cuando el riesgo de *condensaciones superficiales* depende tanto de la *temperatura superficial del cerramiento* como de la *temperatura de rocío del ambiente*, el *Código Técnico de la Edificación* es más exigente que la anterior *Norma Básica de la Edificación sobre condiciones térmicas en los edificios (NBE-CT-79)*, ya que establece que la humedad relativa media mensual, en las superficies interiores de los cerramientos, que puedan absorber agua o sean susceptibles de degradarse, y especialmente en los puentes térmicos, será inferior al 80%.

Tabla 1
Zonas climáticas según el CTE

Provincia	Capital	Altitud (m)	Desnivel entre la localidad y la capital de su provincia (m)				
			≥200 <400	≥400 <600	≥600 <800	≥800 <1000	≥1000
Albacete	D3	677	D2	E1	E1	E1	E1
Alicante	B4	7	C3	C1	D1	D1	E1
Almería	A4	0	B3	B3	C1	C1	D1
Ávila	E1	1054	E1	E1	E1	E1	E1
Badajoz	C4	168	C3	D1	D1	E1	E1
Barcelona	C2	1	C1	D1	D1	E1	E1
Bilbao	C1	214	D1	D1	E1	E1	E1
Burgos	E1	861	E1	E1	E1	E1	E1
Cáceres	C4	385	D3	D1	E1	E1	E1
Cádiz	A3	0	B3	B3	C1	C1	D1
Castellón de la Plana	B3	18	C2	C1	D1	D1	E1
Ceuta	B3	0	B3	C1	C1	D1	D1
Ciudad Real	D3	630	D2	E1	E1	E1	E1
Córdoba	B4	113	C3	C2	D1	D1	E1
La Coruña	C1	0	C1	D1	D1	E1	E1
Cuenca	D2	975	E1	E1	E1	E1	E1
S. Sebastián	C1	5	D1	D1	E1	E1	E1
Gerona	C2	143	D1	D1	E1	E1	E1
Granada	C3	754	D2	D1	E1	E1	E1
Guadalajara	D3	708	D1	E1	E1	E1	E1
Huelva	B4	50	B3	C1	C1	D1	D1
Huesca	D2	432	E1	E1	E1	E1	E1
Jaén	C4	436	C3	D2	D1	E1	E1
León	E1	346	E1	E1	E1	E1	E1
Lérida	D3	131	D2	E1	E1	E1	E1
Logroño	D2	379	D1	E1	E1	E1	E1
Lugo	D1	412	E1	E1	E1	E1	E1
Madrid	D3	589	D1	E1	E1	E1	E1
Málaga	A3	0	B3	C1	C1	D1	D1
Melilla	A3	130	B3	B3	C1	C1	D1
Murcia	B3	25	C2	C1	D1	D1	E1
Orense	C2	327	D1	E1	E1	E1	E1
Oviedo	C1	214	D1	D1	E1	E1	E1
Palencia	D1	722	E1	E1	E1	E1	E1
Palma de Mallorca	B3	1	B3	C1	C1	D1	D1
Las Palmas	A3	114	A3	A3	A3	B3	B3
Pamplona	D1	456	E1	E1	E1	E1	E1
Pontevedra	C1	77	C1	D1	D1	E1	E1
Salamanca	D2	770	E1	E1	E1	E1	E1
Santa Cruz de Tenerife	A3	0	A3	A3	A3	B3	B3
Santander	C1	1	C1	D1	D1	E1	E1
Segovia	D2	1013	E1	E1	E1	E1	E1
Sevilla	B4	9	B3	C2	C1	D1	E1
Soria	E1	984	E1	E1	E1	E1	E1
Tarragona	B3	1	C2	C1	D1	D1	E1

Teruel	D2	995	E1	E1	E1	E1	E1
Toledo	C4	445	D3	D2	E1	E1	E1
Valencia	B3	8	C2	C1	D1	D1	E1
Valladolid	D2	704	E1	E1	E1	E1	E1
Vitoria	D1	512	E1	E1	E1	E1	E1
Zamora	D2	617	E1	E1	E1	E1	E1
Zaragoza	D3	207	D2	E1	E1	E1	E1

Para comprobar esta limitación en los cerramientos y puentes térmicos hay que calcular el *factor de temperatura de la superficie interior (f_{Rsi})* del cerramiento, que es el cociente entre la diferencia de temperatura superficial interior y la del ambiente exterior y la diferencia de temperatura del ambiente interior y exterior.

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad [3]$$

Para conocer la temperatura superficial de la cara interior del cerramiento se puede hacer una lectura gráfica en la escala de temperaturas de dicho cerramiento, o, si se desea obtener mayor precisión, se puede emplear la expresión [1].

En esa expresión, U es la *transmitancia térmica* del cerramiento, partición interior, o puente térmico, expresada en $W/m^2 \cdot K$, y R_{si} la *resistencia térmica superficial interior*, que, cuando se desea evaluar el riesgo de condensaciones superficiales, debe tomar el valor de 0,25 $m^2 \cdot K/W$.

$$\theta_{si} = \theta_i - 0{,}25 \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [4]$$

Incorporando el valor de la θ_{si} en la expresión [3], se obtiene:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} = 1 - U \cdot R_{si} = 1 - 0{,}25U \quad [5]$$

Tabla 2
Factor de temperatura de la superficie interior mínimo ($f_{Rsi,min}$)
(ver la tabla 1 de zonas climáticas)

Clase de higrometría	**5 (lavanderías, piscinas)**	**4 (restaurantes, instalaciones deportivas)**	**3 ó inferior (viviendas)**
Humedad relativa	**70%**	**62%**	**55%**
Zona A	**0,80**	**0,66**	**0,50**
Zona B	**0,80**	**0,66**	**0,52**
Zona C	**0,80**	**0,69**	**0,56**
Zona D	**0,90**	**0,75**	**0,61**
Zona E	**0,90**	**0,78**	**0,64**

El cumplimiento de la limitación del riesgo de condensaciones superficiales en los cerramientos y puentes térmicos, se verifica comprobando que el *factor de temperatura de la superficie interior* (f_{Rsi}) es superior a un *factor de temperatura de la superficie interior mínimo* ($f_{Rsi,mín}$), obtenido del CTE (Tabla 2) en función de la clase de higrometría del espacio y de la zona climática donde se encuentre el edificio.

$$f_{Rsi} > f_{Rsi,mín} \qquad [6]$$

El valor límite del cumplimiento es aquel en el que el valor de f_{Rsi} y de $f_{Rsi,mín}$ coinciden.

$$f_{Rsi} = f_{Rsi,\min} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} = 1 - U \cdot R_{si} = 1 - 0,25U \qquad [7]$$

$$U = \frac{1 - f_{Rsi,\min}}{0,25} \qquad [8]$$

A partir de estos valores del *factor de temperatura de la superficie interior mínimo*, mediante la expresión [8], se pueden obtener los valores de la *transmitancia térmica* máxima con la que se cumpliría la normativa en el aspecto de las condensaciones superficiales. En la tabla 3 se han recopilado los valores de esa U máxima.

Tabla 3
Transmitancia térmica máxima (U) ($W/m^2 \cdot K$)
(ver la tabla 1 de zonas climáticas)

Clase de higrometría	5 (lavanderías, piscinas)	4 (restaurantes, instalaciones deportivas)	3 ó inferior (viviendas)	U máxima por criterios térmicos
Humedad relativa	70%	62%	55%	
Zona A	0,80	1,36	2,00	1,22
Zona B	0,80	1,36	1,92	1,07
Zona C	0,80	1,24	1,76	0,95
Zona D	0,40	1,00	1,56	0,86
Zona E	0,40	0,88	1,44	0,74

A la vista de estos valores, y comparándolos con la transmitancia térmica máxima de la envolvente exigida por el CTE, se puede afirmar que, para los cerramientos y particiones interiores de los espacios de clase de higrometría 4 o inferior, el cumplimiento de la transmitancia térmica máxima de la envolvente, exigida en el CTE, asegura la verificación del cumplimiento de la limitación de las condensaciones superficiales.

También están exentas de la comprobación aquellas particiones interiores que linden con espacios no habitables donde se prevea escasa producción de vapor de agua, así como los cerramientos en contacto con el terreno.

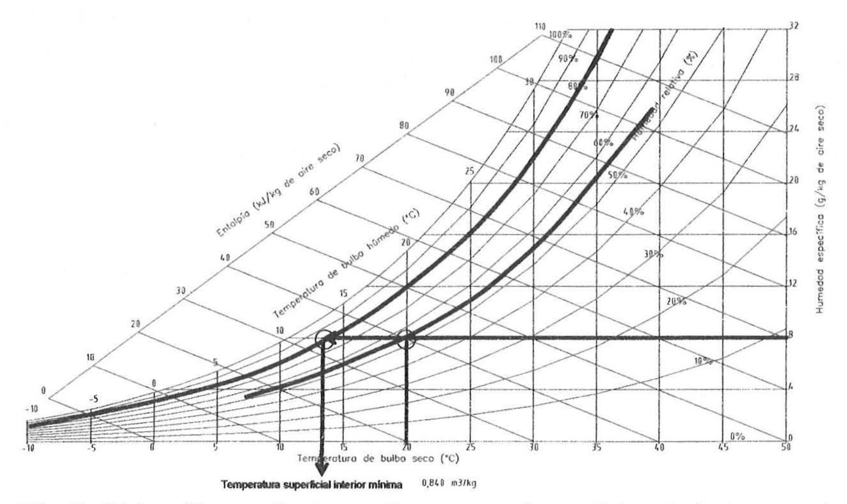


Fig. 2. Obtención mediante un diagrama psicrométrico de la temperatura superficial mínima para un cierto ambiente.

No obstante, debe comprobarse en los puentes térmicos y en los cerramientos de locales de clase higrométrica 5, lo que deberá realizarse por el procedimiento descrito, empleando la expresión [5] y la tabla 2.

Si no se cumple con las exigencias, y dado que la tabla 2 da información por zona climática, en el caso de disponer de información de la localidad concreta suficiente, se podrá calcular el *factor de temperatura de la superficie interior mínimo* a partir de la expresión [9].

$$f_{Rsi,mín} = \frac{\theta_{si,mín} - \theta_e}{20 - \theta_e} \qquad [9]$$

Tabla 4
Temperaturas superficiales interiores mínimas
(Temperatura interior: 20 °C)

Clase de higrometría	Humedad relativa (%)	Temperatura superficial interior mínima $\theta_{si,min}$ (°C)
3 ó inferior (viviendas)	55	14,09
4 (instalaciones deportivas, restaurantes)	62	15,96
5 (lavanderías, piscinas)	70	17,87

La *temperatura superficial interior mínima* ($\theta_{si,min}$) se puede obtener con un procedimiento analítico descrito en el CTE o mediante un diagrama psicrométrico. Para ello habrá que trazar la línea horizontal de HE constante que pase por la temperatura interior (siempre 20 °C) y la humedad relativa interior que corresponda a la clase de higrometría del local. Esa línea debe cortarse con la humedad relativa del

80%, que es la que fija el Código Técnico como límite de riesgo (ver figura 2). Los valores que se obtienen de este procedimiento se han reseñado en al tabla 4.

Tabla 5

Datos climáticos mensuales de las capitales de provincia para los cálculos requeridos en el CTE

Localidad		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Albacete	Tmed	5,0	6,3	8,5	10,9	15,3	20,0	24,0	23,7	20,0	14,1	8,5	5,3
	HRmed	78,0	70,0	62,0	60,0	54,0	50,0	44,0	50,0	58,0	70,0	77,0	79,0
Alicante	Tmed	11,6	12,4	13,8	15,7	18,6	22,2	25,0	25,5	23,2	19,1	15,0	12,1
	HRmed	67,0	65,0	63,0	65,0	65,0	65,0	64,0	68,0	69,0	70,0	69,0	68,0
Almería	Tmed	12,4	13,0	14,4	16,1	18,7	22,3	25,5	26,0	24,1	20,1	16,2	13,3
	HRmed	70,0	68,0	66,0	65,0	67,0	65,0	64,0	66,0	66,0	69,0	70,0	69,0
Avila	Tmed	3,1	4,0	5,6	7,6	11,5	16,0	19,9	19,4	16,5	11,2	6,0	3,4
	HRmed	75,0	70,0	62,0	61,0	55,0	50,0	39,0	40,0	50,0	65,0	73,0	77,0
Badajoz	Tmed	8,7	10,1	12,0	14,2	17,9	22,3	25,3	25,0	22,6	17,4	12,1	9,0
	HRmed	80,0	76,0	69,0	66,0	60,0	55,0	50,0	50,0	57,0	68,0	77,0	82,0
Barcelona	Tmed	8,8	9,5	11,1	12,8	16,0	19,7	22,9	23,0	21,0	17,1	12,5	9,6
	HRmed	73,0	70,0	70,0	70,0	72,0	70,0	69,0	72,0	74,0	74,0	74,0	71,0
Bilbao	Tmed	8,9	9,6	10,4	11,8	14,6	17,4	19,7	19,8	18,8	16,0	11,8	9,5
	HRmed	73,0	70,0	70,0	72,0	71,0	72,0	73,0	75,0	74,0	74,0	74,0	74,0
Burgos	Tmed	2,6	3,9	5,7	7,6	11,2	15,0	18,4	18,3	15,8	11,1	5,8	3,2
	HRmed	86,0	80,0	73,0	72,0	69,0	67,0	61,0	62,0	67,0	76,0	83,0	86,0
Caceres	Tmed	7,8	9,3	11,7	13,0	16,6	22,3	26,1	25,4	23,6	17,4	12,0	8,8
	HRmed	55,0	53,0	60,0	63,0	65,0	76,0	76,0	76,0	78,0	74,0	65,0	57,0
Cádiz	Tmed	12,8	13,5	14,7	16,2	18,7	21,5	24,0	24,5	23,5	20,1	16,1	13,3
	HRmed	77,0	75,0	70,0	71,0	71,0	70,0	69,0	69,0	70,0	73,0	76,0	77,0
Castellón	Tmed	10,1	11,1	12,7	14,2	17,2	21,3	24,1	24,5	22,3	18,3	13,5	11,2
	HRmed	68,0	66,0	64,0	66,0	67,0	66,0	66,0	69,0	71,0	71,0	73,0	69,0
Ceuta	Tmed	11,5	11,6	12,6	13,9	16,3	18,8	21,7	22,2	20,2	17,7	14,1	12,1
	HRmed	87,0	87,0	88,0	87,0	87,0	87,0	87,0	87,0	89,0	89,0	88,0	88,0
Ciudad Real	Tmed	5,7	7,2	9,6	11,9	16,0	20,8	25,0	24,7	21,0	14,8	9,1	5,9
	HRmed	80,0	74,0	66,0	65,0	59,0	54,0	47,0	48,0	57,0	68,0	78,0	82,0
Córdoba	Tmed	9,5	10,9	13,1	15,2	19,2	23,1	26,9	26,7	23,7	18,4	12,9	9,7
	HRmed	80,0	75,0	67,0	65,0	58,0	53,0	46,0	49,0	55,0	67,0	76,0	80,0
La Coruña	Tmed	10,2	10,5	11,3	12,1	14,1	16,4	18,4	18,9	18,1	15,7	12,7	10,9
	HRmed	77,0	76,0	74,0	76,0	78,0	79,0	79,0	79,0	79,0	79,0	79,0	78,0
Cuenca	Tmed	4,2	5,2	7,4	9,6	13,6	18,2	22,4	22,1	18,6	12,9	7,6	4,8
	HRmed	78,0	73,0	64,0	62,0	58,0	54,0	44,0	46,0	56,0	68,0	76,0	79,0
Gerona	Tmed	6,8	7,9	9,8	11,6	15,4	19,4	22,8	22,4	19,9	15,2	10,2	7,7
	HRmed	77,0	73,0	71,0	71,0	70,0	67,0	62,0	68,0	72,0	76,0	77,0	75,0
Granada	Tmed	6,5	8,4	10,5	12,4	16,3	21,1	24,3	24,1	21,1	15,4	10,6	7,4
	HRmed	76,0	71,0	64,0	61,0	56,0	49,0	42,0	42,0	53,0	62,0	73,0	77,0
Guadalajara	Tmed	5,5	6,8	8,8	11,6	15,3	19,8	23,5	22,8	19,5	14,1	9,0	5,9
	HRmed	80,0	76,0	69,0	68,0	67,0	62,0	53,0	54,0	61,0	72,0	79,0	81,0
Huelva	Tmed	12,2	12,8	14,4	16,5	19,2	22,2	25,3	25,7	23,7	20,0	15,4	12,5
	HRmed	76,0	72,0	66,0	63,0	60,0	59,0	54,0	54,0	60,0	67,0	72,0	75,0
Huesca	Tmed	4,7	6,7	9,0	11,3	15,3	19,5	23,3	22,7	19,7	14,6	8,7	5,3
	HRmed	80,0	73,0	64,0	63,0	60,0	56,0	48,0	53,0	61,0	70,0	78,0	81,0
Jaén	Tmed	8,7	9,9	12,0	14,3	18,5	23,1	27,2	27,1	23,6	17,6	12,2	8,7
	HRmed	77,0	72,0	67,0	64,0	59,0	53,0	44,0	45,0	55,0	67,0	75,0	77,0
León	Tmed	3,1	4,4	6,6	8,6	12,1	16,4	19,7	19,1	16,7	11,7	6,8	3,8

	HRmed	81,0	75,0	66,0	63,0	60,0	57,0	52,0	53,0	60,0	72,0	78,0	81,0
Lérida	Tmed	5,5	7,8	10,3	13,0	17,1	21,2	24,6	24,0	21,1	15,7	9,2	5,8
	HRmed	81,0	69,0	61,0	56,0	55,0	54,0	47,0	54,0	62,0	70,0	77,0	82,0
Logroño	Tmed	5,8	7,3	9,4	11,5	15,1	19,0	22,2	21,8	19,2	14,4	9,1	6,3
	HRmed	75,0	68,0	62,0	61,0	59,0	56,0	55,0	56,0	61,0	69,0	73,0	76,0
Lugo	Tmed	5,8	6,5	7,8	9,5	11,7	14,9	17,2	17,5	16,0	12,5	8,6	6,3
	HRmed	85,0	81,0	77,0	77,0	76,0	76,0	75,0	75,0	77,0	82,0	84,0	85,0
Madrid	Tmed	6,2	7,4	9,9	12,2	16,0	20,7	24,4	23,9	20,5	14,7	9,4	6,4
	HRmed	71,0	66,0	56,0	55,0	51,0	46,0	37,0	39,0	50,0	63,0	70,0	73,0
Málaga	Tmed	12,2	12,8	14,0	15,8	18,7	22,1	24,7	25,3	23,1	19,1	15,1	12,6
	HRmed	71,0	70,0	66,0	65,0	61,0	59,0	60,0	63,0	65,0	70,0	72,0	72,0
Melilla	Tmed	13,2	13,8	14,6	15,9	18,3	21,5	24,4	25,3	23,5	20,0	16,6	14,1
	HRmed	72,0	72,0	71,0	70,0	69,0	68,0	67,0	68,0	72,0	75,0	74,0	73,0
Murcia	Tmed	10,6	11,4	12,6	14,5	17,4	21,0	23,9	24,6	22,5	18,7	14,3	11,3
	HRmed	72,0	69,0	69,0	68,0	70,0	71,0	72,0	74,0	73,0	73,0	73,0	73,0
Orense	Tmed	7,4	9,3	10,7	12,4	15,3	19,3	21,9	21,7	19,8	15,0	10,6	8,2
	HRmed	83,0	75,0	69,0	70,0	67,0	64,0	61,0	62,0	64,0	73,0	83,0	84,0
Oviedo	Tmed	7,5	8,5	9,5	10,3	12,8	15,8	18,0	18,3	17,4	14,0	10,4	8,7
	HRmed	77,0	75,0	74,0	77,0	79,0	80,0	80,0	80,0	78,0	78,0	78,0	76,0
Palencia	Tmed	4,1	5,6	7,5	9,5	13,0	17,2	20,7	20,3	17,9	13,0	7,6	4,4
	HRmed	84,0	77,0	71,0	70,0	67,0	64,0	58,0	59,0	63,0	73,0	80,0	85,0
Palma de Mallorca	Tmed	11,6	11,8	12,9	14,7	17,6	21,8	24,6	25,3	23,5	20,0	15,6	13,0
	HRmed	71,0	69,0	68,0	67,0	69,0	69,0	67,0	71,0	73,0	72,0	72,0	71,0
Palmas, Las	Tmed	17,5	17,6	18,3	18,7	19,9	21,4	23,2	24,0	23,9	22,5	20,4	18,3
	HRmed	68,0	67,0	65,0	66,0	65,0	67,0	66,0	67,0	69,0	70,0	70,0	68,0
Pamplona	Tmed	4,5	6,5	8,0	9,9	13,3	17,3	20,5	20,3	18,2	13,7	8,3	5,7
	HRmed	80,0	73,0	68,0	66,0	66,0	62,0	58,0	61,0	61,0	68,0	76,0	79,0
Pontevedra	Tmed	9,9	10,7	11,9	13,6	15,4	18,8	20,7	20,5	19,1	16,1	12,6	10,3
	HRmed	74,0	73,0	69,0	67,0	68,0	66,0	65,0	65,0	69,0	72,0	73,0	74,0
S. Sebastián	Tmed	7,9	8,5	9,4	10,7	13,5	16,1	18,4	18,7	18,0	15,2	10,9	8,6
	HRmed	76,0	74,0	74,0	79,0	79,0	82,0	82,0	83,0	79,0	76,0	76,0	76,0
Salamanca	Tmed	3,7	5,3	7,3	9,6	13,4	17,8	21,0	20,3	17,5	12,3	7,0	4,1
	HRmed	85,0	78,0	69,0	66,0	62,0	58,0	50,0	53,0	62,0	74,0	82,0	86,0
Santa Cruz	Tmed	17,9	18,0	18,6	19,1	20,5	22,2	24,6	25,1	24,4	22,4	20,7	18,8
	HRmed	66,0	66,0	62,0	61,0	60,0	59,0	56,0	58,0	63,0	65,0	67,0	66,0
Santander	Tmed	9,7	10,3	10,8	11,9	14,3	17,0	19,3	19,5	18,5	16,1	12,5	10,5
	HRmed	71,0	71,0	71,0	74,0	75,0	77,0	77,0	78,0	77,0	75,0	73,0	72,0
Segovia	Tmed	4,1	5,2	7,1	9,1	13,1	17,7	21,6	21,2	17,9	12,6	7,3	4,3
	HRmed	75,0	71,0	65,0	65,0	61,0	55,0	47,0	49,0	55,0	65,0	73,0	78,0
Sevilla	Tmed	10,7	11,9	14,0	16,0	19,6	23,4	26,8	26,8	24,4	19,5	14,3	11,1
	HRmed	79,0	75,0	68,0	65,0	59,0	56,0	51,0	52,0	58,0	67,0	76,0	79,0
Soria	Tmed	2,9	4,0	5,8	8,0	11,8	16,1	19,9	19,5	16,5	11,3	6,1	3,4
	HRmed	77,0	73,0	68,0	67,0	64,0	60,0	53,0	54,0	60,0	70,0	76,0	78,0
Tarragona	Tmed	10,0	11,3	13,1	15,3	18,4	22,2	25,3	25,3	22,7	18,4	13,5	10,7
	HRmed	66,0	63,0	59,0	59,0	61,0	60,0	59,0	62,0	67,0	70,0	68,0	66,0
Teruel	Tmed	3,8	4,8	6,8	9,3	12,6	17,5	21,3	20,6	17,9	12,1	7,0	4,5
	HRmed	72,0	67,0	60,0	60,0	60,0	55,0	50,0	54,0	59,0	66,0	71,0	76,0
Toledo	Tmed	6,1	8,1	10,9	12,8	16,8	22,5	26,5	25,7	22,6	16,2	10,7	7,1
	HRmed	78,0	72,0	59,0	62,0	55,0	47,0	43,0	45,0	54,0	68,0	77,0	81,0
Valencia	Tmed	10,4	11,4	12,6	14,5	17,4	21,1	24,0	24,5	22,3	18,3	13,7	10,9
	HRmed	63,0	61,0	60,0	62,0	64,0	66,0	67,0	69,0	68,0	67,0	66,0	64,0

Valladolid	Tmed	4,1	6,1	8,1	9,9	13,3	18,0	21,5	21,3	18,6	12,9	7,6	4,8
	HRmed	82,0	72,0	62,0	61,0	57,0	52,0	44,0	46,0	53,0	67,0	77,0	83,0
Vitoria	Tmed	4,6	6,0	7,2	9,2	12,4	15,6	18,3	18,5	16,5	12,7	7,5	5,0
	HRmed	83,0	78,0	72,0	71,0	71,0	71,0	69,0	70,0	70,0	74,0	81,0	83,0
Zamora	Tmed	4,3	6,3	8,3	10,5	14,0	18,5	21,8	21,3	18,7	13,4	8,1	4,9
	HRmed	83,0	75,0	65,0	63,0	59,0	54,0	47,0	50,0	58,0	70,0	79,0	83,0
Zaragoza	Tmed	6,2	8,0	10,3	12,8	16,8	21,0	24,3	23,8	20,7	15,4	9,7	6,5
	HRmed	76,0	69,0	60,0	59,0	55,0	52,0	48,0	54,0	61,0	70,0	75,0	77,0

A continuación se indican los valores del *factor de temperatura de la superficie interior mínimo* calculados para una localidad de cada zona climática, comparados con los indicados en la tabla 2. Como se observa, hay situaciones en las que dichos valores calculados son menos exigentes que los indicados directamente en el CTE (tabla 6).

Tabla 6
Factor de temperatura de la superficie interior mínimo ($f_{Rsi,mín}$), calculado analíticamente

Clase de higrometría	5 70%		4 62%		3 ó inferior 55%	
	Cálculo analítico	Tabla	Cálculo analítico	Tabla	Cálculo analítico	Tabla
Zona A (Málaga)	0,73	0,80	0,35	0,66	0,24	0,50
Zona B (Córdoba)	0,80	0,80	0.52	0,66	0,44	0,52
Zona C (Barcelona)	0,81	0,80	0,55	0,69	0,47	0,56
Zona D (Madrid)	0,82	0,90	0,63	0,75	0,57	0,61
Zona E (León)	0,87	0,90	0,70	0,78	0,65	0,64

4.1. Soluciones a las condensaciones superficiales

Las condensaciones superficiales se producen por el efecto conjunto de la *temperatura superficial interior mínima* y de la *temperatura superficial interior.* Para evitarlas, por tanto, hay que actuar al menos sobre una de ellas.

Para actuar sobre la *temperatura superficial*, dado que el objetivo es incrementar su valor, es preciso reducir el coeficiente de transmisión de calor incorporando nuevos materiales resistentes, cuando no existan en la solución del muro, o aumentando el espesor de alguno de los existentes. El incremento de espesor que habrá que aplicar al material que se vaya a modificar o el espesor del nuevo material que se vaya a incluir se calculará con la siguiente expresión:

$$e = \lambda \cdot \left(0{,}13 \cdot \frac{\theta_i - \theta_e}{\theta_i - \theta_{si,mín}} - \frac{1}{U} \right) \qquad [10]$$

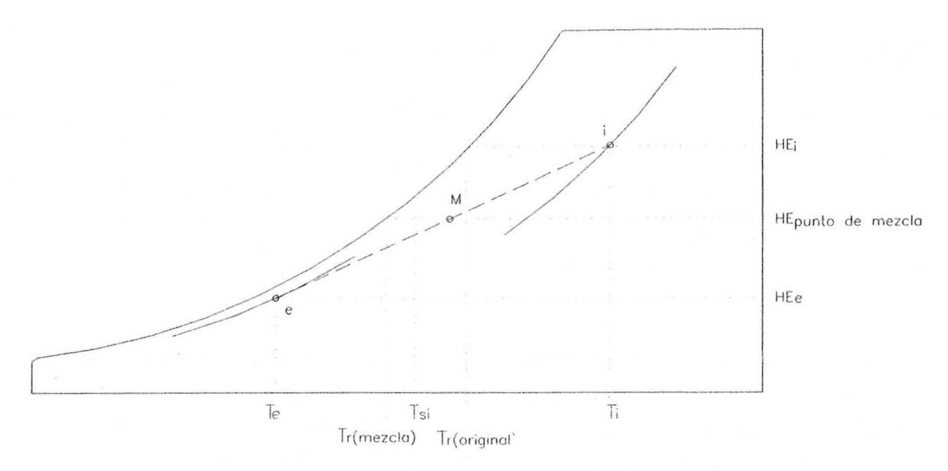


Fig.3. Efecto de la ventilación en la mezcla de aires

Expresión en la que U es el coeficiente de transmisión de calor del cerramiento sin corregir y λ la conductividad térmica del material que se incorpora o cuyo espesor se incrementa. Si lo que va a hacerse es rellenar una cámara de aire existente, el valor de U deberá calcularse previamente sin cámara.

Como regla general hay que decir que cuando se trate de un muro sin aislamiento lo más adecuado es incorporarlo, pero que cuando cuente ya con aislamiento su incremento no va ser una gran solución, a no ser que las condensaciones se estén produciendo sobre algún puente térmico.

El segundo factor que determina el riesgo de condensaciones es la *temperatura superficial interior mínima*. Para reducir su valor, dado que el problema se encuentra en los valores altos, difíciles de superar por las temperaturas superficiales, se debe reducir la humedad específica del ambiente eliminando vapor. Para ello la técnica más sencilla y eficaz es la ventilación del local[2]. La renovación del aire del local necesario es función de la cantidad de vapor que se genere en el interior (Vp) y de las presiones de vapor del aire renovable (P_{vi}) y renovador (P_{ve}); el valor de P_{vi} se debe calcular para la temperatura superficial interior de la pared. La expresión que permite conocer el número mínimo de renovaciones del volumen de la habitación cada hora es la siguiente:

$$N > \frac{Vp}{P_i - P_e} \qquad [11]$$

La cantidad de vapor generada, Vp, se expresa en $g/m^3 \cdot h$. A modo orientativo, en la tabla 7 se indican los niveles de vapor generado en algunas situaciones típicas.

Por ejemplo, en una vivienda que responda al estándar de la tabla 7, la generación de vapor será de 0,9 $g/m^3 \cdot h$, si los cerramientos están mal aislados[3] y,

[2] El aire exterior, al estar notablemente más frío que el interior, a pesar de tener una humedad relativa elevada, tiene una humedad específica más baja y, por tanto, un menor contenido de humedad.

[3] U= 1,0 $W/m^2 \cdot K$; θ_i= 20 °C; HR_i= 60%; Valores medios en Madrid durante el mes de enero: θ_e= 5 °C; HR_e= 77%

por tanto, su temperatura superficial es baja, los valores de las presiones de vapor serán 11,5 y 6,7 mbar. El número de renovaciones de aire a la hora precisas para mantener la presión del vapor interior por debajo de los límites de riesgo es de 0,188. Una habitación con una ventana de superficie media proporciona unas infiltraciones espontáneas de aproximadamente 5,0 m^3/h, que aplicada a un volumen de 40 m^3 proporciona una renovación horaria de 0,125, que sería insuficiente[4]. Gráficamente, en la figura 3, se puede ver el efecto de la ventilación, como mezcla de aires, hasta alcanzar una humedad específica que provoque una *temperatura superficial interior mínima* menor que la temperatura superficial.

Tabla 7
Cantidades de vapor generadas

LOCAL	VAPOR GENERADO ($g/m^3 \cdot h$)
Cocina	0,50
Cuartos de baño	0,16
Resto de locales	0,24

4.2. Casos particulares

Habitualmente, un cerramiento medianamente aislado y en un local que se ventile con regularidad no suele sufrir condensaciones superficiales. Sin embargo, como ya se ha dicho, aún en este caso hay que tener en cuenta la presencia de puentes térmicos, pues en ellos el valor de la U será más elevado y, por tanto, su temperatura superficial más baja[5]. El problema en estos casos suele ser aún más grave, pues la condensación se concentra en una superficie muy pequeña y son mayores los efectos perjudiciales.

Otra causa frecuente de condensaciones superficiales es la temperatura desigual entre las habitaciones. Esto es común en viviendas en las que no existe un sistema centralizado de calefacción, ya que la alternativa suele ser utilizar aparatos individuales que no funcionan simultáneamente, sino únicamente en las habitaciones ocupadas y únicamente en ciertos momentos del día. De este modo, lo que se provoca es que la humedad generada en las habitaciones ocupadas y cálidas tienda a depositarse en las desocupadas y frías.

Si bien lo ideal es utilizar una calefacción que actúe equilibradamente en todas las habitaciones, una forma de paliar los problemas que surgen de este tipo de calefacción es emplear acabados y recubrimientos absorbentes, como pinturas al temple sobre yeso, que actúen como reguladores de la humedad, controlándola y cediéndola para ser ventilada. En algunas ocasiones es necesario emplear pinturas fungicidas, pues en las manchas de humedad se pueden formar hongos microscópicos de gran capacidad higroscópica, que atraen hacia ellos una humedad que no responde a ningún cálculo teórico. Incluso, las mismas sales arrastradas por la capilaridad pueden tener características higroscópicas.

---

[4] BEDOYA FRUTOS, César y NEILA GONZALEZ, F. Javier. Acondicionamiento y Energía Solar en Arquitectura, Madrid, C.O.A.M., 1986.
[5] NEILA GONZALEZ, F. Javier y BEDOYA FRUTOS, César. Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. Madrid, Munilla-Lería. 2005. Capítulo 7. Los puentes térmicos en la construcción.

La otra causa habitual de este tipo de condensaciones es una elevada generación de vapor. Fuentes generadoras son las calefacciones húmedas, que producen gases de combustión y los expulsan directamente al local, el hacinamiento en locales pequeños, los cuartos de baño y las cocinas. La temperatura elevada durante algunas horas del día, y únicamente en algunos locales, también puede ser causa indirecta de condensaciones superficiales, ya que provocará la evaporación de la humedad que contienen los muebles, plantas, jarrones, acuarios, etc., y fomentará la exudación de los ocupantes, para, posteriormente, al reducirse la temperatura ambiente y, por tanto, la de las superficies, condensarse en ellas.

A modo de resumen, hay que decir que las distintas actuaciones que eliminan el riesgo de condensaciones superficiales o reducen sus efectos, en orden de eficacia y, por tanto, de preferencia, serían las siguientes[6]:

- Proyectar y ejecutar edificios bien aislados, sin puentes térmicos, o en el caso de tratarse de rehabilitación proceder al aislamiento de las zonas no aisladas.
- Emplear una calefacción equilibrada térmicamente en todos los locales del edificio.
- Ventilar regularmente las diferentes habitaciones del edificio y, fundamentalmente, aquellas sobre las que se produzcan pequeñas condensaciones nocturnas.
- Evitar las temperaturas interiores extremas (muy altas o muy bajas).
- Ejercer un control sobre las fuentes productoras de vapor, ventilando adecuadamente los locales en los que se produzcan.
- Utilizar acabados absorbentes de humedad.
- Emplear pinturas fungicidas en las zonas con manchas de humedad.

5. LA DIFUSIÓN DEL VAPOR DE AGUA

Resulta fácil comprender cómo se producen las *condensaciones superficiales* pero tal vez no sea tan fácil entender cómo se producen las *condensaciones intersticiales*. A los procesos comentados de enfriamiento y reducción de la capacidad para contener vapor, hay que añadir el fenómeno de la *difusión del vapor*.

Las *condensaciones intersticiales* están provocadas por la acción simultánea de las condiciones ambientales interiores y exteriores. De entre estas condiciones, la cuantía del vapor de agua en el ambiente es el factor determinante.

El vapor de agua, sin tratarse de un gas perfecto, lejos de los puntos de cambio de fase, se comporta aproximadamente como tal. Por tanto, al aplicar la ley de Dalton[7] al aire se obtendría como consecuencia que el vapor de agua ejerce una presión parcial de la total atmosférica (P_A). Esta presión parcial, como

[6] NEILA GONZALEZ, F. Javier y otros. "El comportamiento higrotérmico de los cerramientos: las condensaciones", Madrid, MONTAJES E INSTALACIONES, nº 202, pgs. 77 a 90.
[7] La Ley de Dalton dice que la presión total que ejercen los gases de un recinto es igual a la suma parcial de las presiones que ejercen cada uno de ellos si ocuparan ese mismo espacio.

se sabe por la psicrometría, se denomina presión de vapor (P_v).

La *difusión del vapor* de agua es un proceso altamente complejo. Por este motivo, se suele estudiar creando una analogía con el proceso de transferencias de calor en régimen permanente[8]. Para que esta analogía sea válida, es preciso suponer que el calor desprendido en el cambio de fase del vapor al condensarse, y la reducción de la presión del vapor consecuente, no tienen efectos secundarios considerables.

El vapor de agua tiende a difundirse de un punto a otro de un ambiente gracias a las diferencias de presión de vapor. Igual que el calor se transmite de los ambientes con mayor temperatura a los ambientes con menor temperatura, el vapor de agua se difunde de los puntos donde la presión de vapor es mayor hacia los puntos donde es menor, hasta igualarse los contenidos y presiones.

La mayor o menor facilidad que ofrece el medio para permitir la difusión del vapor de agua la señala un coeficiente denominado *permeabilidad o difusividad al vapor de agua* (d_v), que puede definirse como "la cantidad de vapor de agua que pasa a través de la unidad de superficie, entre dos puntos separados por la unidad de espesor, cuando la diferencia de presión de vapor entre ambos sea la unidad ($g\cdot m/MPa\cdot m^2\cdot s$)". La inversa de este parámetro se denomina *resistividad al vapor*, r_v ($MPa\cdot m^2\cdot s/g\cdot m$).

La difusividad al vapor dè agua a través del aire en calma depende de la temperatura del medio y de la humedad relativa, pudiendo calcularse la incidencia que tiene en su valor el primero de estos parámetros mediante la siguiente expresión:

$$d_v = \frac{d_{v(a\,15\,°C)}\cdot(256-\theta)}{271} \qquad [12]$$

siendo θ la temperatura del ambiente en °C.

Experimentalmente se ha comprobado que la humedad relativa influye más que la temperatura en el valor de la difusividad. Aumenta al aumentar la humedad relativa, y disminuye al disminuir. Sin embargo, aunque no ha podido cuantificarse analíticamente esa influencia, sí se puede afirmar que la variación no es lineal, sino que aumenta notablemente con las humedades relativas altas.

La resistividad al vapor del aire, según la situación, toma los siguientes valores:

Aire en reposo: $r_v = 5{,}5\ MPa\cdot m^2\cdot s/g\cdot m$
Aire en movimiento: $r_v = 0$

5.1. La difusión del vapor de agua a través de los materiales constructivos

Para poder aplicar este concepto ambiental a la difusión a través de los

[8] Régimen permanente o constante de temperaturas es aquel en el que el comportamiento térmico de los sistemas se considera estable e independiente del tiempo.

materiales se creó el coeficiente μ, que es el *factor de resistencia a la difusión del vapor de agua*. Este coeficiente relaciona la difusión de vapor en el aire en calma con la que tendría a través de un material determinado.

$$\mu = \frac{d_{v(aire)}}{d_{v(material)}} = \frac{r_{v(material)}}{r_{v(aire)}} = \frac{r_{v(material)}}{5,5} \quad [13]$$

Para un material concreto, empleando tablas de μ, la resistividad al vapor es:

$$r_v = 5,5 \cdot \mu \quad [14]$$

Cuando este coeficiente es menor que uno quiere decir que el material permite una difusión mayor que la del aire en calma, y si es mayor que es un material con una difusión menor. Por ello, dado que la resistividad al vapor (r_v) es la inversa de la difusividad (d_v), a los materiales resistentes al vapor les corresponden valores de μ altos, y a los materiales poco resistentes valores bajos.

En la tabla 8 se indican los valores del coeficiente de resistencia a la difusión del vapor de agua (μ) y de la resistividad al vapor (r_v) de diferentes materiales constructivos.

Apoyándose de nuevo en la analogía térmica, entre dos ambientes a diferente temperatura, separados por un elemento material, se produce una transferencia de energía a una velocidad impuesta por las características del elemento interpuesto. A todos los coeficientes que indican el comportamiento térmico de la materia les corresponden otros similares que indican su comportamiento frente al vapor de agua. Así, al igual que a la conductividad térmica correspondía la permeabilidad al vapor, y a la resistividad térmica, la resistividad al vapor, a la resistencia térmica corresponde la *resistencia al vapor* (R_v) y a la conductancia térmica la *permeancia al vapor.*

Por ese motivo, cuando lo que se quiere es cuantificar la resistencia que ofrece al paso del vapor de agua un cerramiento homogéneo de espesor distinto de la unidad, la magnitud que se emplea es la resistencia al vapor de agua, R_v ($MPa \cdot m^2 \cdot s/g$), cuyo valor para un espesor de material d y una resistividad r_v es el siguiente.

$$R_v = d \bullet r_v = \frac{d}{d_v} \quad [15]$$

Si se trata de un cerramiento heterogéneo formado por n capas, será:

$$R_v = \sum_{1}^{n} (d \bullet r_v) \quad [16]$$

Tabla 8
COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA DIFUSIÓN DEL VAPOR DE AGUA (μ) Y RESISTIVIDAD AL VAPOR (r_v) DE DIVERSOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS SEGÚN EL CTE

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

FAMILIA	MATERIAL O SISTEMA CONSTRUCTIVO	CONDUCTIVIDAD (W/mK)	DENSIDAD (kg/m^2)	CALOR ESPECÍFICO	FACTOR DE RESISTENCIA AL VAPOR DE AGUA
Pétreos y suelos	Basalto [2700 < d < 3000]	3,500	2850	1000	10000
	Granito [2500 < d < 2700]	2,800	2600	1000	10000
	Piedra pómez natural [d < 400]	0,120	390	1000	6
	Roca natural porosa [por ejem, Lava] d < 1600	0,550	1500	1000	15
	Traquita, andesita [2000 < d < 2700]	1,100	2350	1000	15
	Arcilla o limo [1200 < d < 1800]	1,500	1500	2100	50
	Arena y grava [1700 < d < 2200]	2,000	1450	1050	50
	Arenisca [2200 < d < 2600]	3,000	2400	1000	50
	Asperón [1900 < d < 2500]	1,800	2200	1000	40
	Asperón [1300 < d < 1900]	0,900	1600	1000	20
	Caliza, muy dura [2200 < d < 2590]	2,300	2395	1000	200
	Caliza, dura [2000 < d < 2190]	1,700	2095	1000	150
	Caliza, dureza media [1800 < d < 1990]	1,400	1895	1000	40
	Caliza, blanda [1600 < d < 1790]	1,100	1695	1000	25
	Caliza, muy blanda [d < 1590]	0,850	1500	1000	20
	Silex [2600 < d < 2800]	2,600	2700	1000	10000
	Gneis, Pórfido [2300 < d < 2900]	3,500	2600	1000	10000
	Esquisto, Pizarra [2000 < d < 2800]	2,200	2400	1000	800
	Mármol [2600 < d < 2800]	3,500	2700	1000	10000
	Tierra vegetal [d < 2050]	0,520	2000	1840	1
	Piedra artificial	1,300	1700	1000	40
	Tierra apisonada, adobe, bloques de tierra comprimida [1770 < d < 2000]	1,100	1885	1000	1
Metales	Acero	50,000	7800	450	1,00E+30
	Acero Inoxidable	17,000	7900	460	1,00E+30
	Aluminio	230,000	2700	880	1,00E+30
	Aluminio, aleaciones de	160,000	2800	880	1,00E+30
	Bronce	65,000	8700	380	1,00E+30
	Cobre	380,000	8900	380	1,00E+30
	Cromo	93,700	7160	449	1,00E+30
	Estaño	66,600	7310	227	1,00E+30
	Hierro	72,000	7870	450	1,00E+30
	Hierro, fundición	50,000	7500	450	1,00E+30
	Latón	120,000	8400	380	1,00E+30
	Níquel	90,700	8900	444	1,00E+30
	Plomo	35,000	11300	130	1,00E+30
	Titanio	21,900	4500	522	1,00E+30
	Zinc	110,000	7200	380	1,00E+30
Maderas	Frondosa, muy pesada [d > 870]	0,290	900	1600	50
	Frondosa, pesada 750 < d < 870	0,230	775	1600	50
	Frondosa,de peso medio 565 < d < 750	0,180	660	1600	50
	Frondosa, ligera 435 < d < 565	0,150	500	1600	50
	Frondosa, muy ligera 200 < d < 435	0,130	320	1600	50
	Conífera, muy pesada d >610	0,230	620	1600	20
	Conífera, pesada 520 < d < 610	0,180	570	1600	20
	Conífera, de peso medio 435 < d < 520	0,150	480	1600	20
	Conífera, ligera d < 435	0,130	430	1600	20
	Balsa d < 200	0,057	180	1600	20
	Tablero contrachapado 700 < d < 900	0,240	800	1600	110
	Tablero contrachapado 600 < d < 750	0,210	675	1600	110
	Tablero contrachapado 500 < d < 600	0,170	550	1600	90
	Tablero contrachapado 450 < d < 500	0,150	475	1600	70
	Tablero contrachapado 350 < d < - 450	0,130	400	1600	70
	Tablero contrachapado 250 < d < 350	0,110	300	1600	50
	Tablero contrachapado d < 250	0,090	200	1600	50
	Tablero de partículas 640 < d < 820	0,180	730	1700	20
	Tablero de partículas 450 < d < 640	0,150	545	1700	20

FAMILIA	MATERIAL O SISTEMA CONSTRUCTIVO	CONDUCTIVIDAD (W/mK)	DENSIDAD (kg/m^2)	CALOR ESPECÍFICO	FACTOR DE RESISTENCIA AL VAPOR DE AGUA
Maderas	Tablero de partículas 270 < d < 450	0,130	360	1700	20
	Tablero de partículas 180 < d < 270	0,100	225	1700	20
	Tablero de partículas con cemento d < 1200	0,230	1200	1500	30
	Tableros de fibras, incluyendo MDF 750 < d < 1000	0,200	875	1700	20
	Tableros de fibras, incluyendo MDF 550 < d < 750	0,180	650	1700	20
	Tableros de fibras, incluyendo MDF 350 < d < 550	0,140	450	1700	12
	Tableros de fibras, incluyendo MDF 200 < d < 350	0,100	275	1700	6
	Tableros de fibras, incluyendo MDF d < 200	0,070	180	1700	2
	Paneles de fibras con conglomerante hidráulico 450 < d < 550	0,150	500	1700	12
	Paneles de fibras con conglomerante hidráulico 350 < d < 450	0,120	400	1700	5
	Paneles de fibras con conglomerante hidráulico 250 < d < 350	0,100	300	1700	5
	Tablero de virutas orientadas [OSB] d < 650	0,130	600	1700	30
	Corcho Comprimido	0,100	450	1560	5
	Corcho Expandido puro 100 < d < 150	0,049	125	1560	5
	Corcho Expandido con resinas sintéticas 150 < d < 250	0,055	200	1560	5
	Corcho Expandido con resinas sintéticas 100 < d < 150	0,049	125	1560	5
	Placas de corcho	0,065	450	1500	20
Hormigón	Hormigón con armado transversal al espesor d > 2500	2,500	2600	1000	80
	Hormigón con armado transversal al espesor 2300 < d < 2500	2,300	2400	1000	80
	Hormigón en masa, o sin armado transversal 2300 < d < 2600	2,000	2450	1000	80
	Hormigón en masa o sin armado transversal 2000 < d < 2300	1,650	2150	1000	70
	Hormigón con áridos ligeros 1800 < d < 2000	1,350	1900	1000	60
	Hormigón con áridos ligeros 1600 < d < 1800	1,150	1700	1000	60
	Teja de hormigón	1,500	2100	1000	60
Morteros	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido d >2000	1,800	2100	1000	10
	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1800 < d < 2000	1,300	1900	1000	10
	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1600 < d < 1800	1,000	1525	1000	10
	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1450 < d < 1600	0,800	1525	1000	10
	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1250 < d < 1450	0,700	1350	1000	10
	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 1000 < d < 1250	0,550	1125	1000	10
	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 750 < d < 1000	0,400	875	1000	10
	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco/enlucido 500 < d < 750	0,300	625	1000	10
	Mortero de áridos ligeros [vermiculita, perlita]	0,410	900	1000	10
	Mortero de yeso	0,800	1500	1000	6
Yesos	Placa de yeso o escayola 750 < d < 900	0,250	825	1000	4
	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,250	825	1000	4
	Placas de yeso armado con fibras minerales 800 < d < 1000	0,250	900	1000	4
Enlucidos	Enlucido de yeso 1000 < d < 1300	0,570	1150	1000	6
	Enlucido de yeso d < 1000	0,400	900	1000	6
	Enlucido de yeso aislante 600 < d < 900	0,300	750	1000	6
	Enlucido de yeso aislante 500 < d < 600	0,180	550	1000	6
Plásticos	Acrílicos	0,200	1050	1500	10000
	Cloruro de polivinilo [PVC]	0,170	1390	900	50000
	Linóleo	0,170	1200	1400	800
	Poliacetato	0,300	1410	1400	100000
	Poliamida [nylon] [PA]	0,250	1150	1600	50000
	Poliamida 6,6 [PA6,6] 25%fibra vidrio	0,300	1450	1600	50000
	Policarbonatos [PC]	0,200	1200	1200	5000
	Poliestireno [PS]	0,160	1050	1300	100000
	Polietileno alta DENSIDAD (Kg/m2) [HDPE]	0,500	980	1800	100000
	Polietileno baja DENSIDAD (Kg/m2) [LDPE]	0,330	920	2200	100000
	Polimetilmetacrilato [PMMA]	0,180	1180	1500	50000
	Polipropileno [PP]	0,220	910	1800	10000

FAMILIA	MATERIAL O SISTEMA CONSTRUCTIVO	CONDUCTIVIDAD (W/mK)	DENSIDAD (kg/m^2)	CALOR ESPECÍFICO	FACTOR DE RESISTENCIA AL VAPOR DE AGUA
Plásticos	Polipropileno 25%fibra vidrio	0,250	1200	1800	10000
	Poliuretano [PU]	0,250	1200	1800	6000
	Resina epoxi	0,200	1200	1400	10000
	Resina fenólita	0,300	1300	1700	100000
	Resina poliéster no saturado [UP]	0,190	1400	1200	10000
	Teja plástico	0,200	1000	1000	10000
Cauchos	Butadieno	0,250	980	1000	100000
	Butilo, [isobuteno], compacto/colado en caliente	0,240	1200	1400	200000
	Caucho celular	0,060	70	1500	7000
	Caucho natural	0,130	910	1100	10000
	Caucho rígido [ebonita], sólido	0,170	1200	1400	1,00E+30
	Etileno propileno dieno monómero [EPDM]	0,250	1150	1000	6000
	Neopreno [policloropreno]	0,230	1240	2140	10000
	Poliisobutileno	0,200	930	1100	10000
	Polisulfuro	0,400	1700	1000	10000
Sellantes	Cloruro de polivinilo [PVC] + 40% plastificante	0,140	1200	1000	100000
	Espuma de polietileno	0,050	70	2300	100
	Espuma de poliuretano [PU]	0,050	70	1500	60
	Espuma de silicona	0,120	750	1000	10000
	Espuma elastomérica- flexible	0,050	70	1500	10000
	Sílica gel [desecante]	0,130	720	1000	1,00E+30
	Silicona masilla	0,500	1450	1000	5000
	Silicona pura	0,350	1200	1000	5000
	Uretano o poliuretano [rotura de puente térmico]	0,210	1300	1800	60
Bituminosos	Asfalto	0,700	2100	1000	50000
	Asfalto arenoso	0,150	2100	1000	50000
	Betún puro	0,170	1050	1000	50000
	Betún fieltro o lámina	0,230	1100	1000	50000
Textiles	Subcapa, fieltro	0,050	120	1300	15
	Subcapa, lana	0,060	200	1300	15
	Moquetas, revestimientos textiles	0,060	200	1300	5
Cerámicos	Azulejo cerámico	1,300	2300	840	1,00E+30
	Plaqueta o baldosa cerámica	1,000	2000	800	30
	Plaqueta o baldosa de gres	2,300	2500	1000	30
	Teja de arcilla cocida	1,000	2000	800	30
	Teja cerámica- porcelana	1,300	2300	840	30
Vidrios	Sodocálcico [inc, Vidrio flotado]	1,000	2500	750	1,00E+30
	Cuarzo	1,400	2200	750	1,00E+30
	Vidrio prensado	1,200	2000	750	1,00E+30
Aislantes	EPS Poliestireno Expandido [0,029 W/[mK]]	0,029	30	1000	20
	EPS Poliestireno Expandido [0,037 W/[mK]]	0,038	22	1000	20
	EPS Poliestireno Expandido [0,046 W/[mK]]	0,046	10	1000	20
	XPS Expandido con dióxido de carbono CO2	0,034	37,5	1000	100
	XPS Expandido con hidrofluorcarbonos HFC	0,025	37,5	1000	100
	MW Lana mineral [0,031 W/[mK]]	0,031	40	1000	1
	MW Lana mineral [0,04 W/[mK]]	0,041	40	1000	1
	MW Lana mineral [0,05 W/[mK]]	0,050	40	1000	1
	PUR Proyección con Hidrofluorcarbono HFC [0,028 W/[mK]]	0,028	45	1000	60
	PUR Proyección con CO2 celda cerrada [0,032 W/[mK]]	0,032	50	1000	100
	PUR Proyección con CO2 celda cerrada [0,035 W/[mK]]	0,035	50	1000	100
	PUR Plancha con HFC o Pentano y rev, permeable gases [0,027 W/[mK]]	0,027	45	1000	60
	PUR Plancha con HFC o Pentano y rev, permeable a gases [0,03 W/[mK]]	0,030	45	1000	60
	PUR Plancha con HFC o Pentano y rev, impermeable a gases [0,025 W/[mK]]	0,025	45	1000	1,00E+30
	PUR Inyección en tabiquería con dióxido de carbono CO2	0,040	17,5	1000	20
	Arcilla Expandida [árido suelto]	0,148	537,5	1000	1
	Panel de perlita expandida [EPB] [>80%]	0,062	190	1000	5
	Panel de vidrio celular [CG]	0,050	125	1000	1,00E+30

FAMILIA	MATERIAL O SISTEMA CONSTRUCTIVO	CONDUCTIVIDAD (W/mK)	DENSIDAD (kg/m²)	CALOR ESPECÍFICO	FACTOR DE RESISTENCIA AL VAPOR DE AGUA
Fábricas de ladrillo	Tabique de LH sencillo [40 mm < Espesor < 60 mm]	0,444	1000	1000	10
	Tabicón de LH doble, tabicón [60 mm < E < 90 mm]	0,375	930	1000	10
	Tabicón de LH triple, medio pie, [100 mm < E < 110 mm]	0,434	920	1000	10
	Tabique de LH sencillo Gran Formato [40 mm < E < 60 mm]	0,222	670	1000	10
	Tabicón de LH doble Gran Formato 60 mm < E < 90 mm	0,182	630	1000	10
	Tabicón de LH triple Gran Formato 100 mm < E < 110 mm	0,208	620	1000	10
	1/2 pie LP métrico o catalán 40 mm< G < 60 mm	0,694	1140	1000	10
	1/2 pie LP métrico o catalán 60 mm< G < 80 mm	0,595	1020	1000	10
	1/2 pie LP métrico o catalán 80 mm< G < 100 mm	0,543	900	1000	10
	1 pie LP métrico o catalán 40 mm< G < 60 mm	0,743	1220	1000	10
	1 pie LP métrico o catalán 60 mm< G < 80 mm	0,634	1150	1000	10
	1 pie LP métrico o catalán 80 mm< G < 100 mm	0,553	1000	1000	10
	1/2 pie LM métrico o catalán 40 mm< G < 50 mm	1,042	2170	1000	10
	1 pie LM métrico o catalán 40 mm< G < 50 mm	1,529	2140	1000	10
Fábricas de bloque cerámico de arcilla aligerada	BC con mortero convencional espesor 140 mm	0,438	1170	1000	10
	BC con mortero convencional espesor 190 mm	0,432	1080	1000	10
	BC con mortero convencional espesor 240 mm	0,421	1090	1000	10
	BC con mortero convencional espesor 290 mm	0,426	1080	1000	10
	BC con mortero aislante espesor 140 mm	0,318	1020	1000	10
	BC con mortero aislante espesor 190 mm	0,302	910	1000	10
	BC con mortero aislante espesor 240 mm	0,296	920	1000	10
	BC con mortero aislante espesor 290 mm	0,296	910	1000	10
Fábricas de bloque de hormigón convencional	BH convencional espesor 100 mm	0,625	1210	1000	10
	BH convencional espesor 150 mm	0,789	1040	1000	10
	BH convencional espesor 200 mm	0,909	860	1000	10
	BH convencional espesor 250 mm	1,000	685	1000	10
	BH convencional espesor 300 mm	1,154	585	1000	10
Fábricas de bloque de hormigón aligerado	BH aligerado macizo espesor 200 mm	0,286	840	1000	6
	BH aligerado macizo espesor 250 mm	0,301	850	1000	6
	BH aligerado macizo espesor 300 mm	0,316	860	1000	6
	BH aligerado macizo - muro de carga- espesor 300 mm	0,309	940	1000	6
	BH aligerado hueco espesor 250 mm	0,472	760	1000	6
	BH aligerado hueco espesor 300 mm	0,455	1050	1000	6
	BH aligerado hueco - muro de carga- espesor 300 mm	0,448	1130	1000	6
Forjados unidireccionales	FU Entrevigado cerámico - Canto 250 mm	0,893	1220	1000	10
	FU Entrevigado cerámico - Canto 300 mm	0,938	1110	1000	10
	FU Entrevigado cerámico - Canto 350 mm	1,000	1030	1000	10
	FU Entrevigado de hormigón - Canto 250 mm	1,316	1330	1000	80
	FU Entrevigado de hormigón - Canto 300 mm	1,429	1240	1000	80
	FU Entrevigado de hormigón - Canto 350 mm	1,522	1180	1000	80
	FU Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 250 mm	1,064	1180	1000	6
	FU Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 300 mm	1,154	1090	1000	7
	FU Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 350 mm	1,207	1035	1000	8
	FU Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 400 mm	1,356	985	1000	9
	FU Entrevigado de EPS mecanizado enrasado - Canto 250 mm	0,266	800	1000	60
	FU Entrevigado de EPS mecanizado enrasado - Canto 300 mm	0,256	750	1000	60
	FU Entrevigado de EPS mecanizado enrasado - Canto 350 mm	0,255	700	1000	60
	FU Entrevigado de EPS moldeado enrasado - Canto 250 mm	0,313	790	1000	60
	FU Entrevigado de EPS moldeado enrasado - Canto 300 mm	0,341	740	1000	60
	FU Entrevigado de EPS moldeado enrasado - Canto 350 mm	0,368	690	1000	60
	FU Entrevigado de EPS moldeado descolgado - Canto 250 mm	0,176	710	1000	60
	FU Entrevigado de EPS moldeado descolgado - Canto 300 mm	0,200	670	1000	60
	FU Entrevigado de EPS moldeado descolgado - Canto 350 mm	0,223	640	1000	60
Forjados reticulares	FR FR Entrevigado cerámico - Canto 250 mm	1,667	1660	1000	10
	FR Entrevigado cerámico - Canto 300 mm	1,667	1580	1000	10
	FR Entrevigado cerámico - Canto 350 mm	1,750	1520	1000	10
	FR Entrevigado de hormigón - Canto 250 mm	1,923	1740	1000	10
	FR Entrevigado de hormigón - Canto 300 mm	2,000	1670	1000	10
	FR Entrevigado de hormigón - Canto 350 mm	1,944	1610	1000	10
	FR Entrevigado de hormigón - Canto 400 mm	2,000	1570	1000	10
	FR Entrevigado de hormigón - Canto 450 mm	2,045	1540	1000	10

FAMILIA	MATERIAL O SISTEMA CONSTRUCTIVO	CONDUCTIVIDAD (W/mK)	DENSIDAD (kg/m2)	CALOR ESPECÍFICO	FACTOR DE RESISTENCIA AL VAPOR DE AGUA
Forjados reticulares	FR Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 250 mm	1,786	1645	1000	6
	FR Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 300 mm	1,875	1570	1000	6
	FR Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 350 mm	1,842	1515	1000	6
	FR Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 400 mm	1,905	1480	1000	6
	FR Entrevigado de hormigón aligerado - Canto 450 mm	1,957	1455	1000	6
	FR Entrevigado de EPS mecanizado enrasado - Canto 300 mm	1,304	1470	1000	60
	FR Entrevigado de EPS mecanizado enrasado - Canto 350 mm	1,296	1420	1000	60
	FR Entrevigado de EPS mecanizado enrasado - Canto 400 mm	1,333	1390	1000	60
	FR Entrevigado de EPS mecanizado enrasado - Canto 450 mm	1,324	1360	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado enrasado - Canto 300 mm	1,364	1460	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado enrasado - Canto 350 mm	1,400	1420	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado enrasado - Canto 400 mm	1,379	1380	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado enrasado - Canto 450 mm	1,406	1360	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado descolgado - Canto 300 mm	0,357	1330	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado descolgado - Canto 350 mm	0,402	1310	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado descolgado - Canto 400 mm	0,440	1290	1000	60
	FR Entrevigado de EPS moldeado descolgado - Canto 450 mm	0,479	1280	1000	60
	FR Sin Entrevigado - Canto 250 mm	4,167	2350	1000	80
	FR Sin Entrevigado - Canto 300 mm	4,286	2350	1000	80
	FR Sin Entrevigado - Canto 350 mm	4,375	2350	1000	80
Losas alveolares	Sin capa de compresión - Canto 400 mm	1,818	1180	1000	80
	Sin capa de compresión - Canto 500 mm	2,000	1120	1000	80
	Con capa de compresión - Canto 200 mm	1,429	1810	1000	80
	Sin capa de compresión - Canto 200 mm	1,429	1410	1000	80
	Sin capa de compresión - Canto 250 mm	1,563	1380	1000	80
	Sin capa de compresión - Canto 300 mm	1,579	1290	1000	80
	Sin capa de compresión - Canto 350 mm	1,667	1180	1000	80
Losas alveolares	Con capa de compresión - Canto 250 mm	1,563	1580	1000	80
	Con capa de compresión - Canto 300 mm	1,579	1530	1000	80
	Con capa de compresión - Canto 350 mm	1,667	1440	1000	80
	Con capa de compresión - Canto 400 mm	1,818	1320	1000	80
	Con capa de compresión - Canto 500 mm	2,000	1300	1000	80

En el caso de cerramientos sin continuidad superficial debe emplearse el concepto de *resistencia al vapor útil*, que contempla el efecto de las juntas.

$$\frac{1}{R_v} = \frac{A_m + A_j}{R_{vm} \bullet A_m + R_{vj} \bullet A_j} \qquad [17]$$

Expresión en la que los subíndices m y j hacen referencia al material y a la junta, respectivamente. Esta fórmula es únicamente válida para aquellos cerramientos en los que las discontinuidades y cambios de materiales no implican grandes diferencias de resistividades al vapor. En el caso de que esto ocurra se produciría un efecto similar al del puente térmico[9], el efecto del puente de vapor, ya que si existe un elemento considerablemente más resistente, el vapor, al no tener suficiente presión para atravesarlo tenderá a dirigirse hacia las zonas menos resistentes, dando lugar en los puntos de unión a zonas de alto riesgo[10].

La mayor o menor dificultad que ofrece un cerramiento al paso del vapor se manifiesta en la velocidad con la que éste lo atraviesa: muy alta en materiales con resistividades o espesores pequeños, y muy baja en materiales con resistividades o espesores grandes, siendo estos dos conceptos fundamentales.

---

[9] Al encontrarse las líneas de flujo térmico con un elemento menos resistente tienden a dirigirse hacia él, creando una zona de influencia superior a la dimensión real del puente.
[10] Esto ocurrirá con los elementos de estructura metálica embebidos en el cerramiento.

Sin embargo, en esa velocidad es igualmente importante la diferencia de presión de vapor entre ambos lados del cerramiento (diferencia de temperatura en la analogía térmica), ya que si ésta fuera nula no se produciría ninguna difusión, independientemente del elemento separador. La velocidad de difusión del vapor de agua depende, por tanto, de la diferencia de presiones de vapor entre dos puntos ($\Delta P = P_i - P_e$).

La *ley de Fick* permite calcular la velocidad de difusión del vapor de agua (G_A), a través de la unidad de superficie (A), entre dos puntos de un ambiente en calma y con la misma temperatura, en gramos por segundo y metro cuadrado (g/s·m²).

$$G_A / A = d_v \bullet \frac{\Delta P}{e} \qquad [18]$$

Si entre los puntos entre los que se desea calcular la velocidad de difusión del vapor existe un elemento material con un gradiente de temperatura interna, la expresión [18] pasa a ser variable con respecto a la temperatura, por lo que sólo es aplicable a elementos de espesor muy pequeño en los que se pueda considerar la temperatura constante.

$$G_M / A = \frac{d_v}{\mu} \bullet \frac{\partial P}{\partial e} \qquad [19]$$

en la que G_M es la velocidad de difusión del vapor a través de un material sólido.

Integrando la expresión de la velocidad de difusión [19] para la totalidad del espesor del material, y tomando como límites de la presión de vapor los valores que toma en los ambientes interior y exterior, la expresión se transforma en:

$$G_M / A = \frac{d_v}{\mu} \bullet \frac{\Delta P}{e} \qquad [20]$$

Expresión en la que el primer factor (d_v/μ) queda definido como promedio integral, e indica el valor de una teórica difusividad al vapor media del material.

Resumen de lo dispuesto en el CTE con respecto a las condensaciones superficiales:

- Se comprobará el riego de condensación en:
  - Puentes térmicos
  - Cerramientos en locales con clase de higrometría 5
- No es necesario realizar la comprobación en:
  - Cerramientos que cumplan con las exigencias térmicas del CTE en locales con clase de higrometría 4, 3 o inferior

6. LAS CONDENSACIONES INTERSTICIALES

Según las leyes de la *difusión del vapor* y en función del ritmo que indican las resistividades al vapor de los materiales, el vapor se difunde a través de ellos.

Dado que en los ambientes interiores la temperatura es mayor que en el exterior, su capacidad para contener vapor es superior a la existente fuera, y, aunque dentro haya una humedad relativa del 50% y en el exterior del 90%, la cantidad de vapor que hay en el interior es superior a la del exterior. Esto crea un desequilibrio de presiones de vapor entre ambos ambientes, siendo mayor en el interior, donde hay más humedad que en el exterior, donde hay menos. Esta desigualdad provoca un proceso de difusión del vapor desde el interior hacia el exterior a un ritmo marcado por la diferencia de presiones de vapor (Fig. 4).

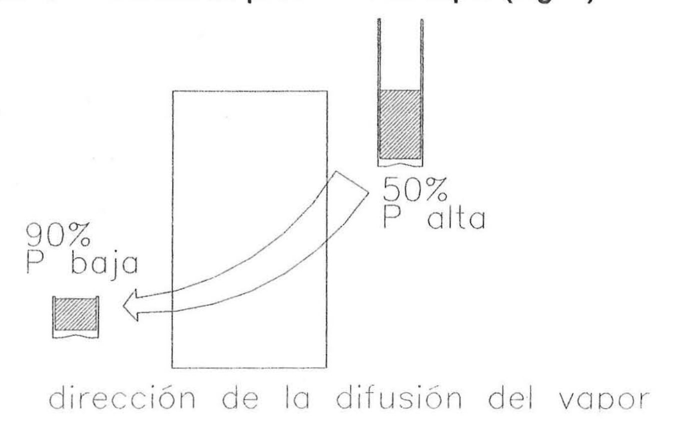


Fig. 4. Sentido que toma la difusión del vapor al atravesar un cerramiento.

En este proceso de difusión, el vapor que atraviesa el cerramiento se puede encontrar con una capa fría en el recorrido que provoque las condensaciones. El riesgo de *condensaciones intersticiales* se comprueba analizando si a lo largo del recorrido este encuentro se produce o no. Para ello se comparan, gráfica o analíticamente, en todos los puntos o en los más significativos, la presión que lleva el vapor con la máxima aceptable, que es la presión de vapor de saturación. Como ésta última es función de la temperatura de la capa, es finalmente la temperatura la responsable del posible cambio de estado del vapor de agua.

PRESIÓN DE VAPOR <> PRESIÓN DE VAPOR DE SATURACIÓN

En el diagrama psicrométrico de la figura 5 se ven las dos posibles situaciones. En el recorrido 1, entre las caras interior y exterior del cerramiento, el vapor mantiene su presión siempre por debajo de la de saturación. Sin embargo, en el recorrido 2, hay una parte del mismo (C-C') en la que el vapor pretende tener mayor presión que la de saturación. Dado que esto es imposible, deberá condensarse parte del vapor para reducir su presión e igualarse con la de saturación.

6.1. Comprobación del riesgo de condensaciones intersticiales

Las presiones de vapor de dos ambientes separados por un elemento material se equilibran, al ser atravesado el cerramiento por el vapor a un ritmo marcado por las resistencias de las láminas del cuerpo. Para representar este fenómeno gráficamente hay que integrar la velocidad de difusión del vapor para un elemento diferencial de materia.

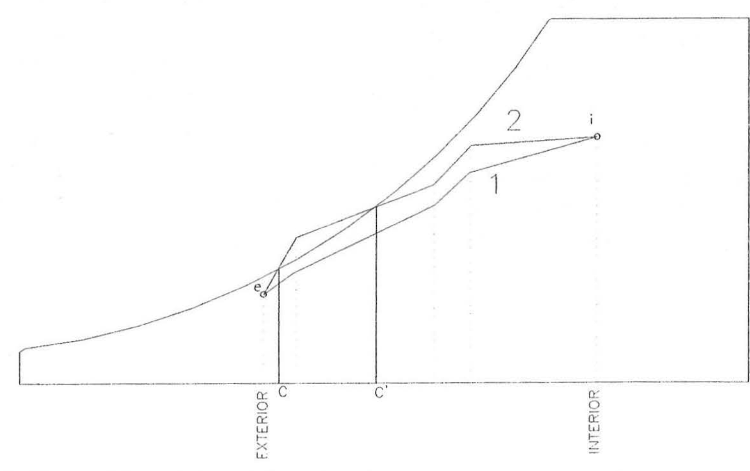


Fig. 5. Recorrido teórico del vapor al atravesar un cerramiento

$$G_M/A = \frac{d_v}{\mu} \bullet \frac{\partial P}{\partial e} \qquad [21]$$

Teniendo en cuenta que se está analizando la difusión del vapor simulando el comportamiento térmico del cerramiento, es fácil imaginar que la integración de esta expresión dará un resultado parecido al de la transmisión del calor por conducción; es decir, una línea recta. De este modo se puede calcular la presión de vapor en cualquier punto de la lámina (P_x) conociendo las presiones inicial y final. Los puntos inicial y final de esta recta corresponden a las presiones de vapor de los ambientes exterior e interior (Fig. 6).

$$P_x = \frac{P_i - P_e}{e} \cdot x + P_e \qquad [22]$$

Si el cerramiento está formado por varias capas de materiales diferentes, la caída de presión en cada capa será proporcional a la resistencia al vapor que ofrezca cada una de ellas. Así, si a la resistencia al vapor total de cerramiento (ΣR_v) corresponde la caída de presión total ($\Delta P = P_i - P_e$), a la resistencia de la primera capa ($Rv_1 = L_1 \cdot r_{v1}$) corresponde una caída de presión parcial (Δp_1):

$$\frac{\Sigma R_v}{\Delta P} = \frac{R_{v1}}{\Delta p_1}$$

$$\Delta p_1 = \Delta P \bullet \frac{R_{v1}}{\Sigma R_v} \qquad [23]$$

Con esta expresión se puede conocer la presión del vapor en cada uno de los puntos del cerramiento en los que cambia el material. Con estos valores, y creando una escala gráfica, se puede dibujar el gradiente de presiones de vapor en el cerramiento, al unir con una línea recta los valores de la presión del vapor en las uniones entre materiales. A igual resultado se puede llegar dibujando las resistencias al vapor de cada material en orden y leer los valores de las presiones de vapor en una escala auxiliar, como se puede ver en la figura 7. Tanto mediante un método como con el otro este gradiente toma el aspecto de una línea poligonal, ya que las líneas tienen diferentes pendientes. Estas pendientes

pueden identificarse con las *resistividades al vapor* de cada material: líneas casi verticales en los materiales muy resistentes, líneas casi horizontales en los materiales poco resistentes y líneas totalmente horizontales en los materiales o situaciones nada resistentes, como es el caso del ambiente exterior en el que el aire se encuentra en movimiento. Como se puede ver en el gráfico, en este caso las capas límites de velocidad o temperatura no ofrecen resistencia, debido a que, aunque en ellas la velocidad de movimiento del aire es inferior a la que hay en la zona de movimiento libre, existe un cierto movimiento que anula su resistencia al vapor.

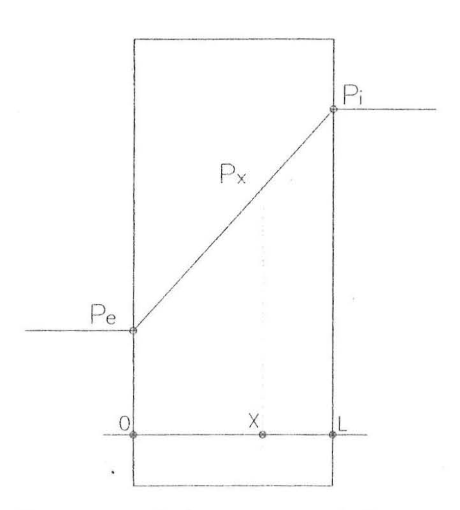


Fig. 6. Representación gráfica de la evolución de la presión de vapor al atravesar un cerramiento monocapa.

Por otro lado, se pueden representar las *presiones de vapor de saturación* de cualquier punto, conociendo únicamente su temperatura, mediante el empleo de un diagrama psicrométrico, ya que a cada temperatura seca corresponde un valor determinado y fijo de la presión de vapor de saturación (el tamaño del vaso). Si se dibuja el gradiente térmico de un cerramiento se conocerán estas temperaturas y, por tanto, sus presiones de vapor de saturación; la línea que representa estas presiones toma un aspecto ligeramente cóncavo de la curva de saturación del diagrama psicrométrico. En la figura 8 se ha hecho una de estas representaciones en un cerramiento monocapa. El valor que indica cada uno de los puntos de esta curva representa la presión ejercida por el vapor de agua en un ambiente totalmente saturado de humedad a la temperatura de la lámina, o lo que es lo mismo, la presión máxima que puede tomar el vapor de agua en cada punto.

Si en cualquier punto del cerramiento la presión de vapor supera la presión de saturación correspondiente, en él se producirá la condensación de una cantidad de agua proporcional a la diferencia de presiones ($P - P_{sat}$). Gráficamente se puede apreciar este hecho en la figura 9 dibujando ambas líneas superpuestas, dando lugar a un cerramiento sin riesgo de condensaciones si no se cortan ambas líneas (caso 1) o con riesgo si se llegan a cortar (caso 2); en este segundo caso, la zona en la que aproximadamente se producirían las condensaciones sería la enmarcada por los puntos de corte (C-C'), es decir, la zona en la que las presiones de vapor fueran mayores que las de saturación. La mayor o menor importancia de las condensaciones no radica en la extensión de la zona C-C', sino en la diferencia de presiones, que finalmente se traducirá en la cantidad de agua que habrá que condensar para compensar la presiones. El diagrama obtenido en esta representación se denomina *diagrama de Glaser*.

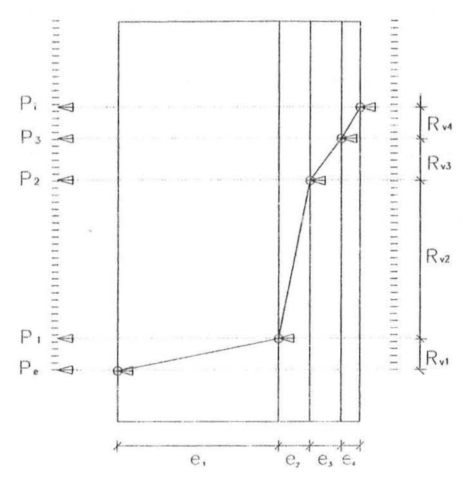


Fig. 7. Representación gráfica de la evolución de la presión de vapor al atravesar un cerramiento multicapa.

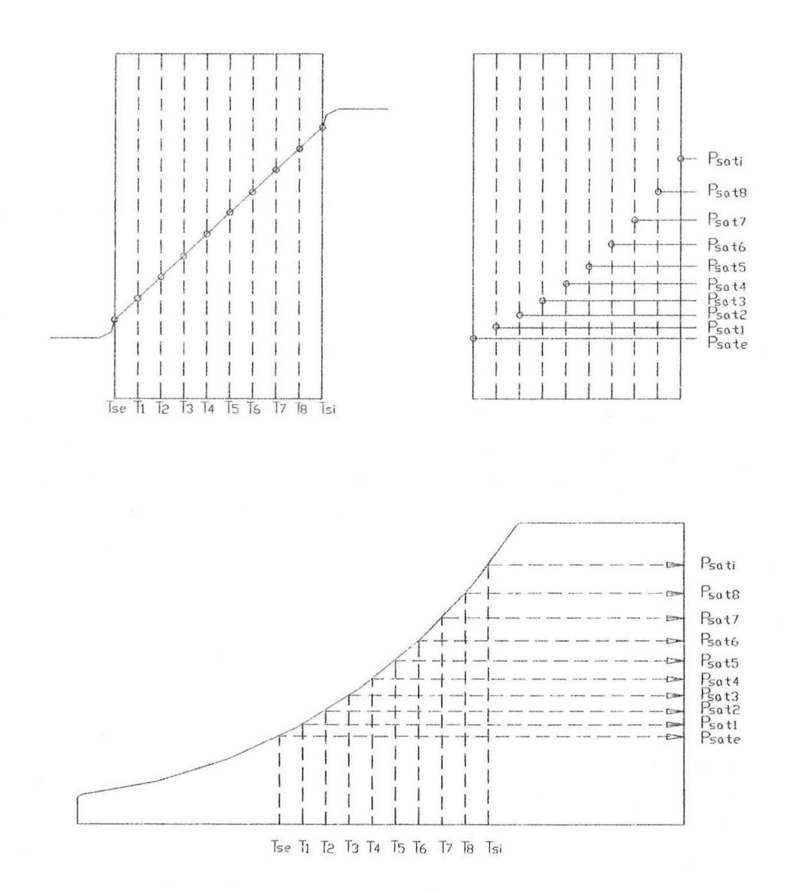


Fig. 8. Representación gráfica de las escalas de temperaturas y presiones de vapor de saturación en un cerramiento multicapa.

Los datos de temperaturas y humedades necesarios para realizar el cálculo bajo supuestos de riesgo los proporciona el *Código Técnico de la Edificación (CTE)*.

Condiciones exteriores para el cálculo:

TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA EXTERIORES:

Los valores medios mensuales de la localidad de ubicación del edificio. Para capitales de provincia los datos se recogen en la tabla 5. Para cualquier otra localidad, el procedimiento a seguir se indica en el apartado G.1.1 del CTE.

Condiciones interiores para el cálculo:

En ausencia de datos más precisos, se tomarán los siguientes:

TEMPERATURA INTERIOR: 20 °C

HUMEDAD RELATIVA INTERIOR:

En función de la clase de higrometría del espacio.

Clase de higrometría 5: 70%
Clase de higrometría 4: 62%
Clase de higrometría 3 o inferior: 55%

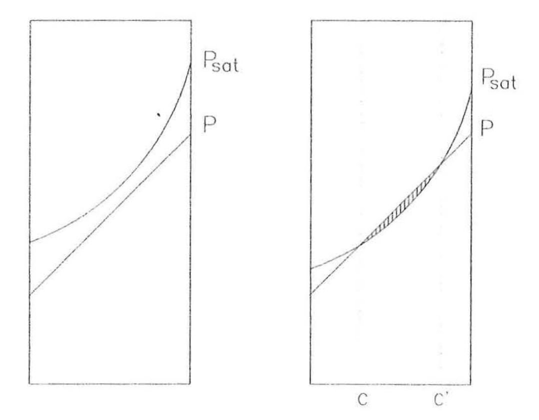


Fig. 9. Representación gráfica del riesgo de condensación intersticial por comparación de las líneas de presión de vapor y de presión de vapor de saturación en un cerramiento monocapa.

El cálculo analítico responde al mismo planteamiento descrito para el método gráfico. Los cálculos se limitan a los puntos (láminas) de separación entre materiales, ya que es ahí donde se determinan los riesgos, no siendo necesario hacer cálculos en puntos intermedios, ni representar la *presión de vapor de saturación* con su curva característica[11]. Para proceder a la comprobación analítica se deben dar los siguientes pasos (Tabla 9 y figura 10):

Fase primera: Determinación de la presión de vapor en los puntos de separación entre materiales.

1.Cálculo de las resistencias térmicas (R) de todas las capas del cerramiento, incluidas las dos capas límite.

2. Cálculo del salto térmico ($\Delta\theta$) que se produce en cada una de las capas;.

3. Cálculo de la temperatura (θ) en cada uno de los puntos (láminas) de

[11] Aunque exista la posibilidad de que se produzcan condensaciones al cortarse las líneas, debido al cuelgue de la curva de las presiones de vapor de saturación, el riesgo es pequeño, y en el caso de producirse su efecto real sería despreciable.

separación entre materiales, añadiendo a la temperatura previa el incremento correspondiente a cada capa.
4. Obtención de la presión de vapor de saturación (P_{sat}) en un diagrama psicrométrico, para cada una de las temperaturas anteriores.

Fase segunda: Determinación de la presión de vapor en los puntos de separación entre materiales.
5. Cálculo de las resistencias al vapor (R_v) de todas las capas materiales del cerramiento.
6. Cálculo del salto de presiones de vapor (Δp) que se produce en cada una de las capas; expresión [18].
7. Cálculo de la presiones de vapor (P) en cada uno de los puntos (láminas) de separación entre materiales, añadiendo a la presión de vapor previa el incremento correspondiente a cada capa.

Fase tercera: Determinación del riesgo.
8. Comparación entre presiones de vapor y presiones de vapor de saturación (P_{sat}<> P) en cada punto y diagnóstico final.

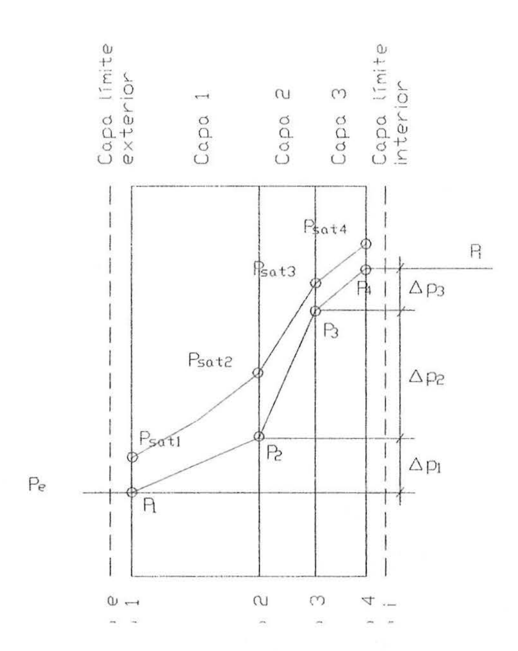


Fig. 10. Representación gráfica del riesgo de condensación intersticial por comparación de las líneas de presión de vapor y de presión de vapor de saturación en un cerramiento multicapa.

Tabla 9

DETERMINACIÓN ANALÍTICA DEL RIESGO DE CONDENSACIONES INTERSTICIALES

CAPA	1 R	2 $\Delta\theta$	3 θ	4 P_{sat}	5 R_v	6 Δp	7 P	8 P_{sat}< P	PUNTO
Ambiente exterior			θ_e				P_e		Punto e
Capa límite exterior	R_{se}	$\Delta\theta_e$							
			$\theta_1 = \theta_{se} = \theta_e + \Delta\theta_e$	P_{sat1}			P_e	Sí/No	Punto 1
Capa 1	R_1	$\Delta\theta_1$			R_{v1}	Δp_1			
			$\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta_1$	P_{sat2}			$P_2 = P_e + \Delta p_1$	Sí/No	Punto 2
Capa 2	R_2	$\Delta\theta_2$			R_{v2}	Δp_2			
			$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta_2$	P_{sat3}			$P_3 = P_2 + \Delta p_2$	Sí/No	Punto 3
Capa 3	R_3	$\Delta\theta_3$			R_{v3}	Δp_3			
			$\theta_4 = \theta_{si} = \theta_3 + \Delta\theta_3$	P_{sat4}			$P_4 = P_i = P_3 + \Delta p_3$	Sí/No	Punto 4
Capa límite interior	R_{si}	$\Delta\theta_i$							
			$\theta_i = \theta_4 + \Delta\theta_i$				P_i		Punto i
Ambiente interior									

6.2. Las condensaciones intersticiales en el Código Técnico de la Edificación

Existe una gran diferencia en el planteamiento que hace de las condensaciones intersticiales el *Código Técnico de la Edificación* en relación con la anterior *Norma Básica de la Edificación sobre condiciones térmicas en los edificios (NBE-CT-79)*. Mientras que esta normativa no admitía en ningún caso la presencia de condensaciones, e ilegalizaba, por tanto, cualquier cerramiento en el que el *diagrama de Glaser* indicara que las líneas se cortaban, independientemente de la cuantía, del agua condensada.

El CTE, salvo expresa justificación en el proyecto, considerará nula la cantidad de agua condensada admisible en los materiales aislantes. Sin embargo, permite la producción de condensaciones intersticiales en el resto de materiales que componen la envolvente térmica del edificio, con la condición de que no produzcan una merma significativa en sus prestaciones térmicas o supongan un riesgo de degradación o pérdida de su vida útil, y que la máxima condensación acumulada en cada periodo anual no sea superior a la cantidad de evaporación posible en el mismo periodo, es decir, se seque completamente al llegar el verano. Esta consideración, salvo excepción, sólo está pensada para cerramientos sin aislante térmico, ya que es el propio aislante térmico el que genera el riesgo de condensación intersticial, y sería imposible que en un cerramiento con aislante térmico se diera simultáneamente que no se produjeran condensaciones en el aislante y sí en el resto de materiales.

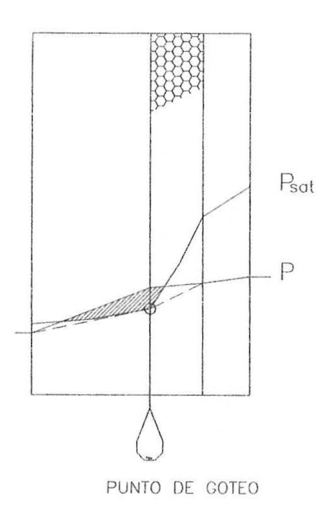


Fig. 11. Representación gráfica del punto de goteo

La cuantificación del agua condensada se realiza en el punto de goteo del material (punto g), evaluando la cantidad de agua que llega hasta él y restando posteriormente la que sale desde él. Se realiza mediante la siguiente expresión:

$$M_{CI} = 2{,}4 \cdot 10^{6} \cdot t \cdot \left(\frac{P_i - P_g}{R_{vi}} - \frac{P_g - P_e}{R_{ve}} \right) \qquad [24]$$

en la que:

M_{Cl} Masa de agua condensada (g/m²).
t Período de tiempo (días).
P_i Presión de vapor del ambiente interior (mbar).
P_e Presión de vapor del ambiente exterior (mbar).
P_g Presión de vapor del ambiente en el punto de goteo; coincide con la presión de vapor de saturación en ese punto (Pa).
R_{vi} Resistencia al vapor de los materiales situados entre el punto de goteo y el interior (MPa·m²·s/g).
R_{ve} Resistencia al vapor de los materiales situados entre el punto de goteo y el exterior (MPa·m²·s/g).

En la expresión [24] el primer término entre paréntesis representa el vapor que entra, y el segundo el vapor que sale debido a la menor presión en el exterior. El cálculo debe realizarse para todos los meses, empezando por un mes cálido en el que no hay condensación. Si en algún mes el resultado de la expresión es positivo querrá decir que hay condensación, se acumulara el agua condensada y se sumará al valor del mes siguiente. Si el valor del mes siguiente es negativo querrá decir que se está produciendo el secado del cerramiento y se restará del acumulado hasta el momento (Fig. 12)

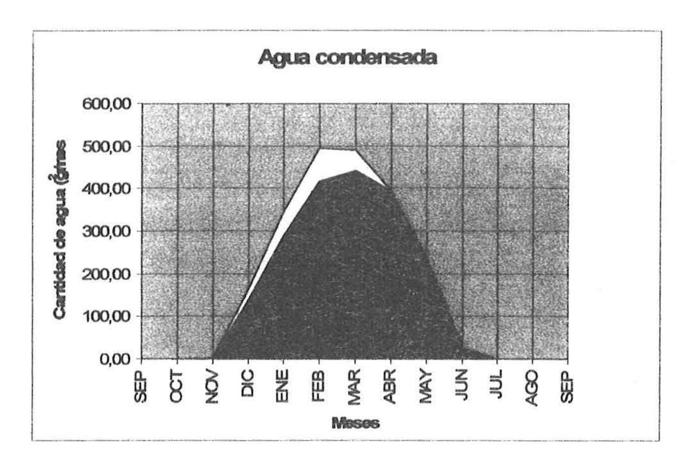


Fig. 12. Representación gráfica del riesgo de condensación intersticial por comparación de las líneas de presión de vapor y de presión de vapor de saturación en un cerramiento multicapa.

A pesar de la aparente complejidad del cálculo, en el CTE se indica que estarán exentos de la comprobación los cerramientos en contacto con el terreno y los que dispongan de barrera contra el paso de vapor de agua en la parte caliente del cerramiento. Del mismo modo, para particiones interiores en contacto con espacios no habitables en los que se prevea gran producción de humedad, se colocará la barrera de vapor en el lado de dicho espacio no habitable.

Resumen de lo dispuesto en el CTE con respecto a las condensaciones intersticiales:

- No se admite condensación sobre el material aislante
- Se admite condensación sobre el resto de materiales siempre que en un ciclo anual se sequen por completo
- No es necesario realizar la comprobación en:
    - Cerramientos con barrera de vapor en el lado cálido
    - Cerramientos en contacto con el terreno

o Particiones interiores

7. CASOS CONCRETOS

En las figuras 13 y 14 aparecen representados casos concretos de cerramientos monocapa en los que varían tanto las condiciones ambientales interiores y exteriores, como las del material. En ellos se puede apreciar cómo las variaciones de la temperatura interior o exterior no tiene efectos negativos, ya que, partiendo de unas condiciones ambientales sin riesgo (20 °C y 50% de HR, interior, y 0 °C y 90% de HR, exterior) al bajar una de estas temperaturas baja la presión de vapor del ambiente en cuestión, y con él las líneas de presiones de vapor; pero también, al bajar la temperatura de las capas del cerramientos bajan los valores de las presiones de vapor de saturación y la posición de la curva que las representa. Este movimiento acompasado de ambas líneas hace difícil que lleguen a cortarse.

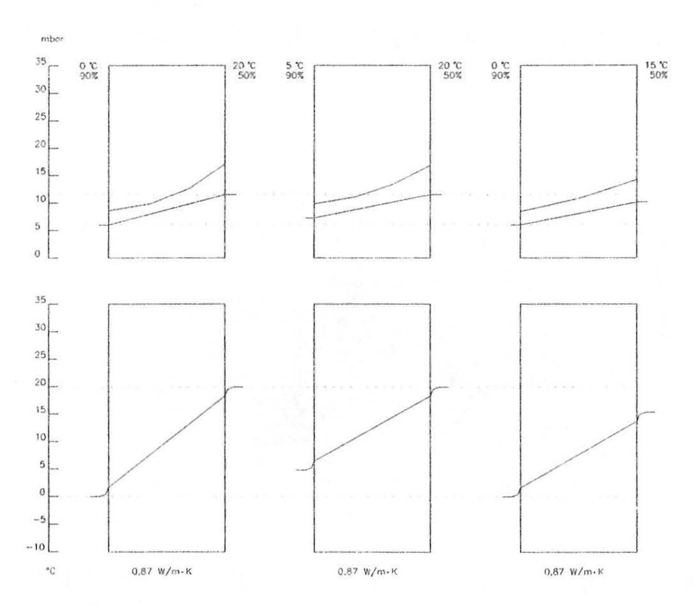


Fig. 13. Riesgo de condensaciones en cerramientos monocapa en los que se han variado las condiciones ambientales

El efecto de cambio de material (Fig. 14) es aún menor, ya que no existe ningún efecto sobre las presiones de vapor, que, en este caso monocapa, sólo depende de las condiciones interiores y exteriores, y el efecto sobre las presiones de vapor de saturación es muy pequeño, ya que sólo hay una pequeña variación de las temperaturas de las láminas al variar las temperaturas superficiales[12]. El único efecto destacable sobre el riesgo de condensaciones intersticiales es la humedad relativa interior, que, si es muy elevada, acerca el valor de la presión de vapor interior a la de saturación. Como la temperatura de la primera capa, la superficial, es inferior siempre a la temperatura ambiente, el valor de la presión de vapor de saturación de esta capa será presumiblemente inferior a la del vapor; este efecto es tanto mayor, cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre el ambiente y la cara de la pared, es decir, cuanto peor esté aislado y más alto sea el coeficiente de transmisión del muro.

[12] La temperatura superficial depende de la resistencia total del cerramiento y, por tanto, de las características térmicas y espesores de los materiales que lo forman.

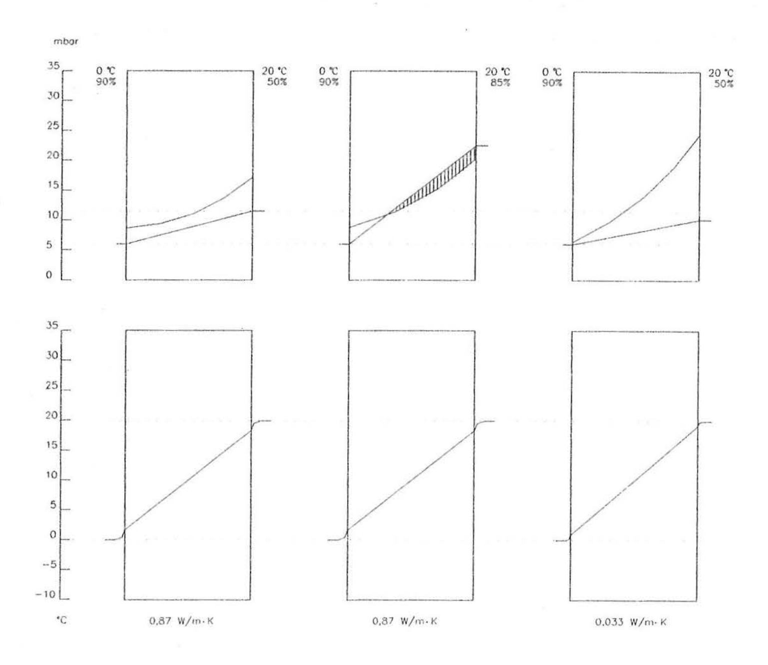


Fig. 14. Riesgo de condensaciones en cerramientos monocapa en los que se han variado las condiciones de humedad y el material.

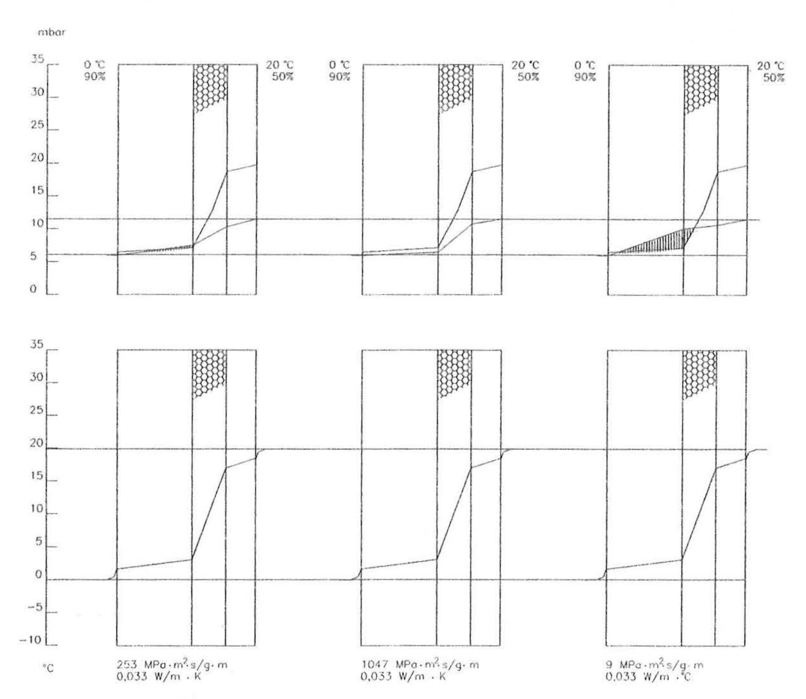


Fig. 15. Riesgo de condensaciones en cerramientos multicapa en función del material aislante.

Si se trata de cerramientos multicapa el problema se complica, pues al relacionarse unos materiales con otros surgen líneas quebradas para representar las líneas de presión de vapor y de presión de vapor de saturación. Si todos los materiales que conforman el cerramiento fueran similares en cuanto a su comportamiento higrotérmico (calor y vapor) se estaría en presencia de un caso muy similar al de los monocapas; sin embargo, los cerramientos incorporan

habitualmente, al menos un material que rompe esta regla, el material aislante, que se diferencia claramente del resto en su comportamiento térmico. El tipo de material aislante y su posición serán factores de riesgo nuevos a considerar.

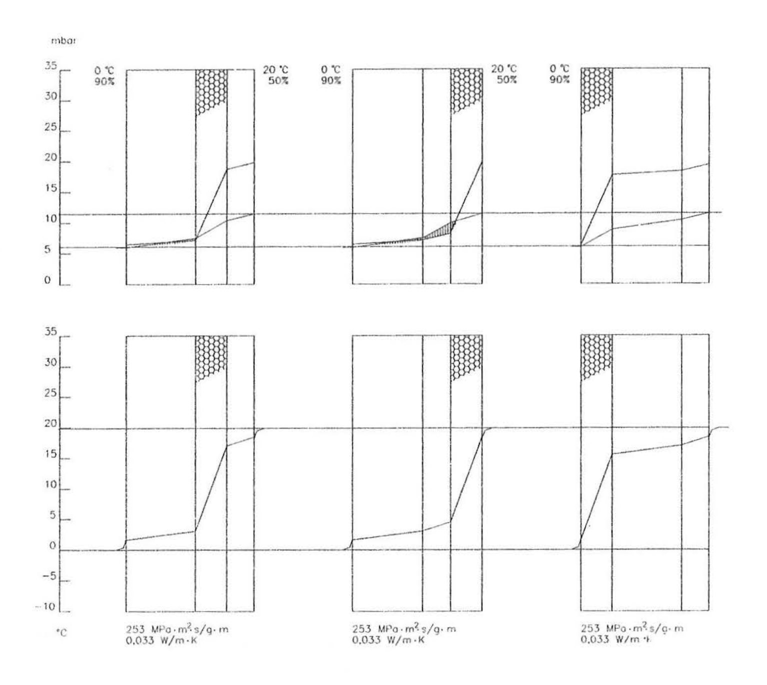


Fig. 16. Riesgo de condensaciones en cerramientos multicapa en función de la posición del material aislante.

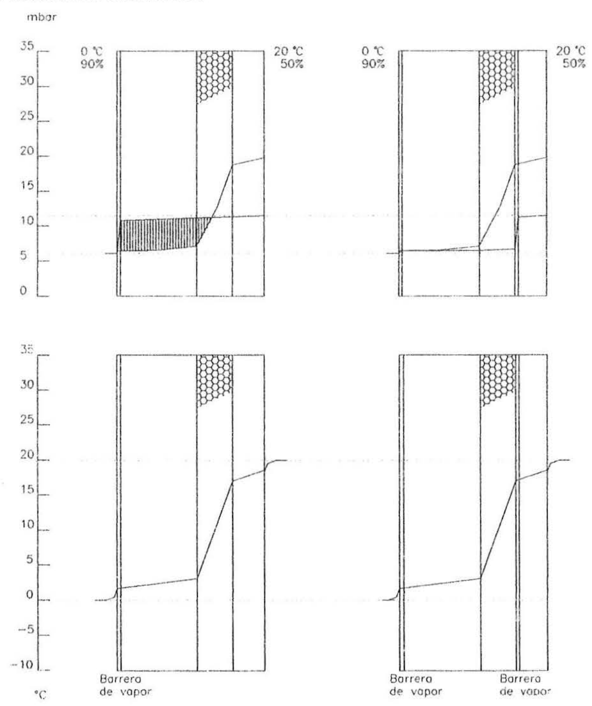


Fig. 17. Influencia de la posición de la barrera de vapor en el riesgo de condensaciones en cerramientos multicapa.

7.1. Los efectos del material aislante en el riesgo de condensaciones intersticiales

El material aislante provoca un salto térmico en torno al 70% del total, forzando, por tanto, un salto muy brusco de las presiones de vapor de saturación. Este hecho que es común a todos los materiales específicamente aislantes no tiene equivalencia en cuanto a su comportamiento resistente al vapor, pues si bien existen materiales aislantes que además tienen una alta resistividad al vapor existen otros poco o nada resistentes al vapor; los primeros son los de estructura celular cerrada, como los poliestirenos extruidos o los vidrios celulares, y los segundos son los de fibra abierta, como las lanas de vidrio o las lanas de roca. En la figura 15 se ve un ejemplo con tres cerramientos en los que únicamente varía el material aislante. A pesar de ser distintos, los tres comparten conductividad térmica, 0,033 W/m·°C. Sin embargo, sus resistividades al vapor son diferentes: el primero, que es poliestireno expandido, tiene una resistividad al vapor de 253 $MPa \cdot m^2 \cdot s/g \cdot m$, el segundo, que es poliestireno extruido, tiene una resistividad al vapor de 1047 $MPa \cdot m^2 \cdot s/g \cdot m$, y el tercero, que es lana de vidrio tiene una resistividad al vapor de 9 $MPa \cdot m^2 \cdot s/g \cdot m$. Las diferencias son tan notables que da lugar a tres situaciones muy diferenciadas: pequeño riesgo en el primer caso, riesgo nulo en el segundo y riesgo altísimo en el tercero. Por ese motivo, y generalizando, se puede decir que aquellos materiales con una resistividad térmica alta y con una resistividad al vapor baja tienen riesgo de provocar condensaciones intersticiales en el cerramiento en el que se encuentren. Así, en los casos de la figura 15 habría condensaciones en los cerramientos con poliestireno expandido y lana de vidrio, que tienen una resistividad al vapor media o baja, (resistividades desequilibradas) y no habría en el cerramiento con poliestireno extruido, cuya resistividad al vapor es elevada (resistividades equilibradas).

Si bien el orden de colocación de los materiales a la hora de obtener el coeficiente de transmisión de calor es totalmente indiferente[13], desde el punto de vista de la difusión del vapor y el riesgo de condensaciones intersticiales la influencia es enorme, ya que los mismos materiales situados en orden diferentes pueden provocar en unos casos condensaciones y en otros no. Lógicamente es el aislante el responsable principal de este efecto, ya que al provocar un salto térmico muy importante divide prácticamente en dos al muro: la zona fría, donde hay más riesgo de condensaciones, por ser más bajas las presiones de vapor de saturación, y la zona caliente, donde hay menos riesgo por el motivo contrario. Como se puede ver en la figura 16, la posición del aislante en la cara fría del muro (caso 3), es decir, el aislamiento por el exterior, convierte en caliente a la práctica totalidad del muro y elimina por completo el riesgo de condensaciones, mientras que por el interior (caso 1) el riesgo es elevado. Esta solución, que será válida de forma genérica sin necesidad de ninguna comprobación específica, la necesitará cuando la humedad relativa interior sea muy alta (la equivalente a un local húmedo); como se ha visto hasta ahora la humedad relativa interior alta es el desencadenante de gran parte de los problemas, y el motivo por el que las soluciones generalmente buenas dejen de serlo.

---

[13] El orden de colocación de los materiales sólo tiene una influencia térmica global en el comportamiento de los locales, por cuanto se modifica la inercia térmica del cerramiento en cada solución.

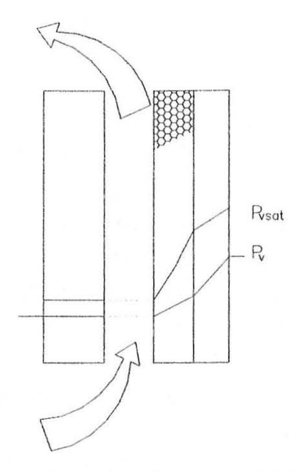


Fig. 18. Influencia de la cámara de aire ventilada en el riesgo de condensaciones en cerramientos multicapa.

El espesor del aislante también influye en el riesgo de condensaciones, aunque en este caso sea una influencia simbólica. Los aislantes con espesores muy pequeños, entre 2 y 5 mm, no provocan riesgo ya que su presencia como aislantes casi no se detecta. Por otro lado, los aislantes con grandes espesores, más de 50 cm, tampoco las provocan, ya que en este caso la enorme presencia del aislante convierte al cerramiento en virtualmente monocapa.

La zona climática y, por tanto, la temperatura exterior, tiene una importancia decisiva a la hora de elegir el material aislante adecuado, y determinar cuáles son soluciones viables y cuáles no. En la tabla 10 se proporcionan los valores de las temperaturas mínimas hasta las cuales se puede emplear cada material aislante, sin que produzca condensaciones intersticiales[14]. Igualmente aparecen reseñadas las zonas climáticas en las que, en relación con esas temperaturas, puede utilizarse cada material aislante.

7.2. El factor de desequilibrio higrotérmico

Los efectos provocados por las diferencias entre la resistividad térmica y la resistividad al vapor, y mencionados en el punto anterior, se pueden cuantificar con un coeficiente denominado *factor de desequilibrio higrotérmico*, y que relacionando la resistividad térmica y la de vapor del material nos ayuda a comprender el problema y a preverlo.

$$fdh = \frac{r}{r_v} \qquad [25]$$

Para la ubicación convencional de los materiales aislantes dentro del cerramiento, los valores del *factor de desequilibrio higrotérmico* altos serán causa de condensaciones, pero, como se analizará más adelante, únicamente la incorrecta colocación de todos los materiales respecto a su *factor de desequilibrio higrotérmico* es la causa de las condensaciones intersticiales, por lo que no se puede dar una tabla de buenos o malos valores. Sin embargo, si se puede hacer

[14] El cálculo se ha realizado con un cerramiento convencional formado por medio pie de ladrillo perforado cara vista, cinco centímetros de aislante, un ladrillo hueco sencillo y un enlucido de yeso. Las condiciones interiores son las aplicables a viviendas con calefacción seca, 18 °C y 60% de humedad relativa.

una clasificación según el grado de desequilibrio:

Materiales equilibrados	fdh < 0,075
Materiales medianamente equilibrados	0,075 < fdh < 0,150
Materiales desequilibrados	0,150 < fdh < 1,000
Materiales muy desequilibrados	1,000 < fdh

Tabla 10
FACTORES DE DESEQUILIBRIO HIGROTÉRMICO (fdh) DE DIVERSOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS

MATERIAL	FACTOR DE DESEQUILIBRIO HIGROTÉRMICO
Bloque de hormigón	0,027
Bloque de termoarcilla	0,149
Cartón yeso	0,111
Enlucido de yeso	0,056
Espuma de poliuretano conformada I	0,453
Espuma de poliuretano conformada II	0,343
Espuma de poliuretano conformada III	0,270
Espuma de poliuretano conformada IV	0,136
Espuma de poliuretano in situ I	0,572
Espuma de poliuretano in situ II	0,530
Hormigón armado	0,006
Hormigón en masa	0,014
Ladrillo hueco	0,068
Ladrillo macizo	0,021
Ladrillo perforado	0,037
Ladrillo silicocalcáreo 1200 kg/m^3	0,039
Ladrillo silicocalcáreo 1600 kg/m^3	0,023
Ladrillo silicocalcáreo 1800 kg/m^3	0,013
Ladrillo silicocalcáreo 2000 kg/m^3	0,007
Lana de roca FMP-FMF	2,480
Lana de roca FMC	2,604
Lana de roca FMB	2,506
Lana de vidrio FVM1-FVP1	2,525
Lana de vidrio FVM2-FVP2	3,003
Lana de vidrio FVP5	3,268
Lana de vidrio FVP4	3,367
Lana de vidrio FVP3	3,087
Madera de conífera	0,119
Mortero de cemento	0,007
Poliestireno expandido I	0,127
Poliestireno expandido II	0,141
Poliestireno expandido III	0,156

Poliestireno expandido V	0,120
Poliestireno expandido VI	0,142
Poliestireno extruido	0,056...0,029
Tablero aglomerado	0,313

7.3. La ordenación y combinación de materiales en el riesgo de condensaciones intersticiales

Mucho más importante que las propiedades intrínsecas de cada material, la combinación entre varios será la causante de las condensaciones. Así, un cerramiento realizado exclusivamente con fibra de vidrio no generaría condensaciones, pero, dado que es imprescindible combinarlo con otros que le den rigidez y lo protejan de las inclemencias del clima, la unión entre ellos sí provocará condensaciones.

En el caso de emplear materiales con diferentes *factores de desequilibrio higrotérmico,* la solución consiste en ordenarlos adecuadamente. El orden correcto ideal es con los *factores de desequilibrio higrotérmico* crecientes desde dentro hacia fuera. Con este planteamiento, y sean cuales sean los materiales que se empleen jamás existirá riesgo de condensaciones intersticiales.

Si por criterios o exigencias constructivas se debe alterar este orden no se debe colocar en la cara fría de un material otro cuyo *factor de desequilibrio higrotérmico* sea muy inferior al suyo. En cualquier caso, los materiales clasificados como muy desequilibrados deben ir colocados lo más cerca posible del exterior del cerramiento.

La combinación entre varios materiales a la hora de conformar el cerramiento será una solución con riesgo de condensaciones cuando, al menos uno de ellos, esté desequilibrado higrotérmicamente. Esto le ocurre a los bloques de termoarcilla, que siendo bastante aislantes, su resistividad al vapor es baja. Este bloque constituido en muro sin ningún acabado no tiene riesgo de condensaciones, pero, dado que por su terminación exige un recubrimiento de acabado, al enfoscarlo exteriormente y enlucirlo por el interior, y colocar desordenados los materiales sin cumplir con los límites indicados, provoca en algunas zonas climáticas, aunque en pequeña medida, *condensaciones intersticiales.*

Dado que las *condensaciones intersticiales* provienen fundamentalmente de la mala combinación de materiales, ya que ninguno es bueno o malo en si mismo, la combinación de materiales homogéneos en su comportamiento, es decir, con *factores de desequilibrio higrotérmico* parecidos, eliminará los riesgos. Los materiales con *factores de desequilibrio higrotérmico* muy extremos, como son los materiales aislantes, difícilmente combinarán con ningún otro, por lo que exigen de un tratamiento específico.

8. SOLUCIONES A LAS CONDENSACIONES INTERSTICIALES

Como se puede apreciar, las situaciones mencionadas anteriormente como causas de condensaciones, son, en si mismas, soluciones preventivas si se utilizan adecuadamente. Es decir, el empleo de materiales aislantes suficientemente equilibrados higrotérmicamente evita cualquier riesgo. Igualmente, la construcción de muros calientes, es decir, con el aislamiento situado en la cara exterior del muro, también elimina los riesgos de condensaciones, al tiempo que incrementa la inercia térmica de los locales, hecho que favorece la estabilidad térmica en locales de uso continuado.

Sin embargo, no en todos los casos es posible (problemas constructivos o económicos) o conveniente (locales de uso eventual) emplear las soluciones anteriores. Para esos otros casos existe la posibilidad de emplear materiales específicamente diseñados para actuar contra el vapor de agua. Estos materiales son las *barreras de vapor*, cuya misión, a pesar de lo equívoco del nombre, no es detener el paso del vapor, sino permitir su paso pero ofreciéndole una gran resistencia para reducir su presión. Los materiales considerados como barreras de vapor son aquellos cuya resistencia al vapor se encuentre entre 10 y 230 $MPa \cdot m^2 \cdot s/g$. Estos valores, como todas las resistencias, son poco clarificadores, pues se podrían alcanzar con cualquier tipo de material con solo aumentar su espesor. Así, incluso un elemento de lana de vidrio podría ser barrera de vapor, si tuviera 1,11 m de espesor. Si bien, es importante la resistencia del elemento, no hay que olvidar que lo que se pretende es crear una línea de presiones de vapor con una pendiente equivalente a la de las presiones de vapor de saturación, lo que únicamente se consigue con la resistividad. Por eso es conveniente hacer suficiente distinción entre las soluciones constructivas que, cumpliendo con otra función aislante, resistente o de recubrimiento, superan el valor mínimo fijado, y los materiales barrera de vapor específicos, como son los que alcanzan las mismas resistencias pero con espesores muy pequeños[15].

De este modo, materiales aislantes, que únicamente se podían utilizar en zonas climáticas cálidas, a pesar de contar con grandes cualidades térmicas, constructivas o económicas, combinan su resistividad térmica con la resistividad al vapor de la barrera, convirtiéndolos en conjuntos perfectamente equilibrados.

Tabla 11
RESISTENCIAS DE BARRERAS DE VAPOR

BARRERA DE VAPOR	R_v ($MPa \cdot m^2 \cdot s/g$)
Aluminio de 8 μm, hoja de	$4{,}0 \times 10^3$
Papel Kraft	0,43
Papel Kraft con oxiasfalto	9,7
Papel vinílico	5,0...10,0
Pintura al esmalte	7,5...40,0
Polietileno de 0,10 mm, lámina de	230,0
Polietileno de 0,05 mm, lámina de	103,0
Poliéster de 25 μm, lámina de	24,0

La colocación de la barrera de vapor, como es fácil de imaginar, es también un factor determinante, ya que, como su función va a ser provocar un

[15] Hoja de aluminio, lámimas de poliéster o polietileno, pintura al esmalte, papel vinílico, etc.

salto brusco en la línea de presiones de vapor, dando lugar a un escalón, su posición puede hacer que se evite el corte con la línea de presiones de vapor de saturación o que, por el contrario, se produzca un corte mayor (Fig. 17). La posición más habitual de este material es junto al aislante, ya que en muchos casos vienen unidos de fábrica. Es importante que la barrera de vapor esté situada en la parte más próxima al ambiente interior, pues en caso contrario su resultado puede ser contraproducente, como se ve en la figura 17, y favorecer las condensaciones. De hecho, la posición teóricamente más favorable es la de la cara interior del cerramiento, pero lógicamente ahí únicamente podrán disponerse aquellas barreras que al tiempo sean recubrimientos, como los papeles vinílicos (R_v = 5...10 MPa·m^2·s/g) o las pinturas al esmalte (R_v = 7,5...40 MPa·m^2·s/g).

La posición auténticamente desfavorable de la barrera de vapor es en la cara exterior del cerramiento, ya que ahí provoca inevitablemente la condensación. Existen casos en los que ciertas soluciones constructivas de acabado exterior tienen un comportamiento similar al de una barrera de vapor: acabados cerámicos vitrificados, prefabricados metálicos o aislamiento exterior altamente resistente al vapor, aunque, si bien en si mismos constituyen auténticos tapones al vapor, las llagas y uniones permiten que a través de ellos escape el vapor que no puede hacerlo por el material, y reduzcan el problema. A pesar de ello, y teniendo en cuenta que sigue siendo una situación de alto riesgo, en los casos en los que no se pueda o no convenga sustituir los recubrimientos exteriores por otra solución, habrá que analizar gráficamente la cuantía del problema planteado y compensarlo con una barrera de vapor específica, situada cerca del ambiente interior, que tenga una resistencia al vapor varias veces superior a la resistencia al vapor útil de la solución exterior .

Otra técnica válida en estos casos es la cámara de aire ventilada. Si la cámara de aire no está ventilada, su comportamiento será el de cualquier otro material resistente, tanto en cuanto el aire esté en calma. Sin embargo, en la cámara ventilada, a pesar de perder cualquier capacidad resistente, la ventilación permite sustituir el aire interior cargado de vapor, y por tanto con alta presión, por aire exterior menos cargado de vapor por estar más frío y, por tanto, con menor presión; de esta manera actúa como una barrera de vapor, ya que fija una presión del vapor menor al otro lado del elemento.

La cámara de aire en cerramientos con aislante, por motivos térmicos, debe ir situada en la cara fría del aislante. Si la cámara está suficientemente ventilada se perderá la resistencia térmica de la lámina exterior, pero llevará la presión de vapor exterior al interior de la cámara, creando, de hecho, un cerramiento con el aislante por el exterior, solución óptima desde el punto de vista de las condensaciones (Fig. 18).

A modo de resumen se puede decir que el riesgo de condensaciones intersticiales en un cerramiento depende de cinco hechos:

1. Las condiciones ambientales interiores de bienestar.
2. Las condiciones climáticas de la zona en la que se ubique el edificio.
3. Las características higrotérmicas del material aislante.
4. El factor de posición del material aislante dentro del cerramiento.
5. La barrera de vapor: características resistentes y factor de posición.

Sobre los dos primeros puntos la única actuación posible es el control de la

humedad relativa interior, que deberá procurarse que no sea muy alta, evitando fuentes generadoras de humedad y ventilando. Sobre los otros tres factores el control es de tipo constructivo.

9. EFECTO DEL AGUA CONDENSADA

Evidentemente no todas las condensaciones tendrán los mismos resultados, no sólo por la diferente constitución del cerramiento, sino por la cuantía del agua condensada. De ahí el interés que tiene poder evaluar esta cantidad. Sin embargo, su cálculo resulta complicado, pues no se puede trabajar en régimen permanente, ya que a partir del momento en que comienza a producirse la condensación, los valores variarían constantemente al modificarse las temperaturas, las presiones de vapor y, por tanto, la velocidad de difusión.

Uno de los efectos que provoca la presencia de agua condensada en el interior de un cerramiento es su influencia sobre la conductividad térmica de los materiales afectados, que en el caso de estar anegados se modificaría tendiendo hacia la propia del agua, 0,59 W/m·K. Indudablemente el material que más puede sufrir este efecto es aquel que debe cumplir un cometido aislante, pues al recae sobre él el 70 u 80% de esta responsabilidad, una reducción de su resistividad térmica tiene efectos muy negativos: aumento de la carga del local, incremento del consumo de energía, enfriamiento de la cara interior del cerramiento, reducción de las condiciones de bienestar, etc.

La conductividad térmica de un material húmedo (λ_h) se puede calcular con la expresión de Krischer:

$$\lambda_h = \lambda + 0{,}66 \bullet \frac{d_v}{\mu} \bullet c_{l(H2O)} \bullet P_r \bullet \frac{P_A}{P_A - P_{sat}} \bullet \frac{\Delta P_{sat}}{\Delta \theta} \qquad [26]$$

expresión en la que $c_{l(H2O)}$ es el calor latente de evaporación del agua (2,44 x 10^3 J/g) y P_r la porosidad del material.

Como ejemplo, para un material afectable como es la lana de vidrio, con una porosidad del 98%, una conductividad térmica de 0,034 W/m·K y un coeficiente μ de1,86 (a 10 °C), si la presión atmosférica es de 0,101 MPa y la presión de vapor de saturación (a 10 °C)[16] es de 1,228 x 10^{-3} MPa, se obtiene:

$$\lambda_h = 0{,}034 + 0{,}66 \bullet \frac{0{,}22}{1{,}86} \bullet 2{,}44 \bullet 10^3 \bullet 0{,}98 \bullet \frac{0{,}101}{0{,}101 - 1{,}228 \bullet 10^{-3}} \bullet$$

$$\bullet \frac{(2{,}338 - 1{,}228) \bullet 10^{-3}}{20 - 10} = 0{,}034 + 0{,}021 = 0{,}055 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Lo que representa un aumento de más del 60% de la conductividad térmica del aislante y una reducción de la resistencia térmica del cerramiento en casi un 45%.

Cuando las condensaciones se producen sobre el aislante, la existencia de una cámara de aire con orificios de drenaje hacia el exterior puede solucionar

[16] Temperatura media del material suponiendo: θ_e= 0 °C, θ_i= 20 °C.

parcialmente el problema, evitando la acumulación de agua en el material.

Otro problema adicional puede aparecer cuando el material aislante es de origen vegetal (corcho o fibra de madera) y, por tanto, afectable por el agua, lo que supondría su deterioro por pudrición al cabo del tiempo. Igual problema puede surgir cuando la condensación se produce sobre algún otro elemento natural del cerramiento, como pudieran ser los elementos estructurales de madera de un cerramiento antiguo, o cualquier acabado o elemento auxiliar del mismo material.

CUADERNO

228.01

CATÁLOGO Y PEDIDOS EN

http://www.aq.upm.es/of/jherrera

info@mairea-libros.com

84-9728-218-3

